

Dipl.-Ing. Andreas Georg Maximilian Hasenstab

**Integritätsprüfung von Holz
mit dem zerstörungsfreien
Ultraschallechoverfahren**

Die vorliegende Arbeit entstand an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Es handelt sich hierbei um eine bei der Fakultät VI der Technischen Universität Berlin eingereichte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften – Dr.-Ing. – vorgelegt von Dipl.-Ing. Andreas Georg Maximilian Hasenstab aus München.

Die Dissertation wurde mit dem Adolf-Martens-Doktorandenpreis ausgezeichnet.

Promotionsausschuss: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler (Vorsitzender)
 Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier (Berichter)
 Prof. Dipl.-Ing. Claus Scheer (Berichter)
 Dr. rer. nat. Martin Krause (Berichter)

Tag der
wissenschaftlichen Aussprache: 13. Dezember 2005

Impressum

**Integritätsprüfung von Holz mit dem
zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren**

2006

Herausgeber:
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright © 2006 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
27568 Bremerhaven
Telefon: +49 471 94544-0
Telefax: +49 471 94544-77

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.67

ISSN 1613-4249
ISBN 3-86509-527-5

KURZFASSUNG	1
ABSTRACT.....	2
FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	3
1 EINLEITUNG	5
2 FRAGESTELLUNG UND AUFBAU	8
3 WERKSTOFF HOLZ UND SCHADENSMECHANISMEN.....	10
3.1 WERKSTOFF HOLZ	10
3.1.1 MAKROSKOPISCHER AUFBAU	10
3.1.2 MIKROSKOPISCHER AUFBAU	12
3.1.3 CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG	13
3.1.4 PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN	13
3.1.5 INHOMOGENITÄTEN IM HOLZ WIE RISSE, ÄSTE UND WUCHSFEHLER	14
3.2 SCHADENSMECHANISMEN	16
3.2.1 HOLZZERSTÖRENDE INSEKTEN	16
3.2.2 HOLZZERSTÖRENDE MEERESTIERE.....	17
3.2.3 HOLZZERSTÖRENDE PILZE	18
4 STAND DER TECHNIK DER PRÜFUNG VON HOLZ.....	21
4.1 ZERSTÖRUNGSARME PRÜFVERFAHREN.....	21
4.1.1 UNTERSUCHUNG DES PENETRATIONSWIDERSTANDES	21
4.1.2 BOHRKERNUNTERSUCHUNG, ENDOSKOPIE, WIDERSTANDSMESSUNG	22
4.1.3 (GEO-) ELEKTRISCHE TOMOGRAPHIEMESSUNGEN.....	22
4.1.4 BOHRWIDERSTANDSMESSUNGEN	23
4.2 ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFVERFAHREN.....	25
4.2.1 OPTISCHE UNTERSUCHUNGSVERFAHREN	26
4.2.2 MECHANISCHE UNTERSUCHUNGSVERFAHREN	27
4.2.3 ELEKTROMAGNETISCHE VERFAHREN.....	28

4.2.4	LASERINDUZIERTE BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS)	29
4.2.5	DURCHSTRAHLUNGSVERFAHREN	29
4.2.6	ULTRASCHALL	32
4.3	ÜBERSICHT ÜBER DIE FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN DER HOLZINSTITUTE MIT ULTRASCHALL	37
5	GRUNDLAGEN ZUR ULTRASCHALLTECHNIK UND DEREN ANWENDUNG AN HOLZ.....	39
5.1	ULTRASCHALLTECHNIK KURZ ERLÄUTERT	39
5.2	ULTRASCHALLVERFAHREN UND DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE	44
5.2.1	DURCHSCHALLUNGSVERFAHREN	44
5.2.2	ECHOVERFAHREN.....	46
5.2.3	DARSTELLUNG DER ULTRASCHALLERGEBNISSE.....	46
5.3	ASPEKTE DER SCHALLAUSBREITUNG IN HOLZ	47
5.3.1	AUSWIRKUNG DER ANISOTROPIE	47
5.3.2	EINFLÜSSE AUF DIE SCHALLGESCHWINDIGKEIT	52
5.3.3	SCHALLÜBERGANG UND REFLEXIONEN AN PRAXISRELEVANTEN GRENZFLÄCHEN.....	53
6	VERWENDETE ULTRASCHALLVERFAHREN.....	56
6.1	PRÄZISIERUNG DER FRAGESTELLUNG NACH BEARBEITUNG DER GRUNDLAGEN	56
6.2	EXPERIMENTELLER AUFBAU	57
6.2.1	VERWENDETE SENDEIMPULSE UND VERSTÄRKER	58
6.2.2	PRÜFKÖPFE ZUR ANREGUNG VON LONGITUDINAL- UND TRANSVERSALWELLEN	59
6.2.3	MESSDATENAUFNAHME UND VERARBEITUNG	63
6.2.4	BESTIMMUNG DER SCHALLGESCHWINDIGKEITEN	63
6.3	VERSUCHSKÖRPER.....	64
6.4	PRÜFKÖRPEROBERFLÄCHE UND ANKOPPLUNG DER SCHALLKÖPFE	65
6.5	AUSBREITUNGSVERHALTEN VON NIEDERFREQUENTEN LONGITUDINAL- UND TRANSVERSALWELLEN IN HOLZ.....	67
6.5.1	TOTE ZONE DER PRÜFKÖPFE DURCH OBERFLÄCHENWELLEN	67
6.5.2	EINFLUSS DER PRÜFKOPFANORDNUNG RELATIV ZUM FASERWINKEL	68
6.5.3	VERGLEICH DER MESSERGEBNISSE UNTERSCHIEDLICHER ANREGUNGS-IMPULSE, PRÜFFREQUENZEN UND PRÜFKÖPFE.....	72

6.5.4	MESSUNGSICHERHEIT UND FEHLERBETRACHTUNG	73
6.5.5	GEMESSENE SCHALLGESCHWINDIGKEITEN UND VERGLEICH MIT DER LITERATUR	77
6.6	LAUFZEITKORRIGIERTE ÜBERLAGERUNG UND SAFT	81
6.7	ULTRASCHALLVERFAHREN MIT ANKOPPLUNG ÜBER LUFT	82
7	ERGEBNISSE DER ECHOMESSUNGEN.....	87
7.1	MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN VON ULTRASCHALLECHO	87
7.1.1	MESSOBERFLÄCHEN	87
7.1.2	MAXIMALE PROBEKÖRPERABMESSUNGEN	88
7.1.3	RISSE.....	90
7.1.4	RISS IN BRETTSCHICHTHOLZ	91
7.1.5	BOHRUNGEN	94
7.1.6	ÄSTE.....	95
7.1.7	FÄULNIS	98
7.2	ZUSAMMENFASSUNG DER ECHOERGEBNISSE UND VERGLEICH BEIDER VERWENDETER WELLENARTEN	99
7.3	ZUSAMMENFASSUNG ULTRASCHALL.....	100
8	RÖNTGENEXPERIMENTE AN HOLZ.....	102
9	PRAXISANWENDUNG UND VERFAHRENSKOMBINATION.....	103
10	SCHLUSSBETRACHTUNG	105
10.1	ZUSAMMENFASSUNG	105
10.2	PRAKTISCHE ANWENDUNGSBEREICHE UND MÖGLICHKEITEN	106
10.3	GRENZEN DER VERFAHREN	107
10.4	AUSBLICK.....	107
11	LITERATURVERZEICHNIS.....	A-1
12	VERÖFFENTLICHUNGEN	A-18
13	DANKSAGUNG	A-20

14	ANHANG	A-21
A.1	KONTAKTE.....	A-21
A.1.1	MITTEILUNGEN	A-21
A.1.2	PERSÖNLICHE BESUCHE	A-22
A.2	ULTRASCHALL	A-23
A.2.1	SCHALLDRUCK UND SCHALLFELD VON ULTRASCHALL	A-23
A.2.2	VERSUCHSKÖRPER.....	A-25
A.2.3	A-BILDER UNTERSCHIEDLICHER FREQUENZEN VON LONGITUDINALWELLEN	A-27
A.2.4	ERGEBNISSE AM PROBEKÖRPER P1 MIT DER LONGITUDINAL- UND TRANSVERSALWELLEN	A-28
A.2.5	LAUFZEITKORRIGIERTE ÜBERLAGERUNG UND SAFT.....	A-28
A.3	RÖNTGENEXPERIMENTE AN HOLZ	A-30
A.3.1	ALLGEMEINE GRUNDLAGEN ZUR RÖNTGENTECHNIK	A-30
A.3.2	EXPERIMENTELLER AUFBAU	A-31
A.3.3	ERGEBNISSE DER RÖNTGENMESSUNG AN HOLZ.....	A-34
A.3.4	ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER RÖNTGENERGEBNISSE	A-44
A.4	BEISPIELE FÜR DIE PRAXISANWENDUNG VON ULTRASCHALLECHOVERFAHREN AN HOLZBAUTEILEN.....	A-45
A.4.1	LÖSUNGEN VON PRÜFAUFGABEN IM PRAXISEINSATZ	A-45
A.4.2	DEMONSTRATIONEN DER MÖGLICHKEITEN ZUR BESTIMMUNG VON BAUTEILABMESSUNGEN UND MINDERDICKEN	A-49
A.4.3	DEMONSTRATIONEN DER MÖGLICHKEITEN ZUR BESTIMMUNG DER INTEGRITÄT ...	A-55
A.5	VERGLEICHENDE VERFAHRENSKOMBINATIONEN ZUR ORTUNG VON SCHÄDEN....	A-58
A.5.1	VERGLEICHENDER EINSATZ VON RÖNTGEN- UND ULTRASCHALLECHOMESSUNGEN AN SPARREN MIT INNENFÄULE	A-58
A.5.2	KOMBINATION DER ULTRASCHALLECHO-MESSUNGEN MIT RÖNTGEN-MESSUNGEN UND LIBS AN BALKEN MIT SCHÄDIGUNG VON UNZUGÄNGLICHER BAUTEILSEITE ..	A-66
A.5.3	KOMBINIRTER EINSATZ VON RÖNTGENMESSUNG, SCHALLTOMOGRAPHIE UND ELEKTRISCHER TOMOGRAPHIE AN BAUM MIT KERNFÄULE	A-71

Kurzfassung

Schadstellen im Inneren von Holzbauteilen (z. B. Innenfäule) oder baulich unzugängliche Oberflächenfäule, stellen ein besonderes Problem dar, da diese von außen schlecht erkannt werden können und bei einer ausgeprägten Schädigung zu einem plötzlichen Versagen des Bauteils führen können.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Messapparatur zu entwickeln und damit zu untersuchen, ob und unter welchen Bedingungen Ultraschallechoverfahren an Holzbauteilen möglich sind. Weiter sollte untersucht werden, welche Schäden und Minderdicken mit Ultraschallecho von nur einer zugänglichen Seite aus geortet werden können.

Ergebnis war, dass die Ultraschallecho-Technik an Holz mit Longitudinal- und Transversalwellen möglich ist. Es gelang erstmals, die Geschwindigkeiten in Holz für alle Polarisations- und Ausbreitungsrichtungen mit Niederfrequenzultraschall zu bestimmen. Für die Ankopplung der Longitudinalwellenprüfköpfe G 0,2 GC (Mittenfrequenz 100 kHz) waren an glatten Oberflächen Koppelmittel wie Ultraschall-Gel, an rauen Oberflächen Vaseline erforderlich. Dieses Verfahren erwies sich für kleinere Bauteile mit Dicken unter 10 cm als besser geeignet.

Für die Ankopplung der Punktkontaktprüfköpfe TD20 der Transversalwellen (Mittenfrequenz 55 kHz) werden keine Koppelmittel benötigt. Da hiermit auch Bauteile mit größeren Dicken untersucht werden können, eigneten sich die Transversalwellen für viele praktische Messungen besser als die Longitudinalwellen.

Minderdicken, Aussparungen, Versätze, Holzdübel und große Äste können meist als direktes Echo detektiert werden, alle restlichen Störungen, wie z. B. Fäulnisschäden oder Insektenbefall, durch eine Abschattung des Rückwandechos. Mit der an einer zugänglichen Stelle aus Schallweg und Schalllaufzeit bestimmten Schallgeschwindigkeit kann das Echo an einer Minderdicke oder Aussparung eindeutig einer Tiefenlage zugeordnet werden.

Um die Störungen, die eine Abschattung der Rückwand verursachen, zu verifizieren, wurde die Durchstrahlung mit Röntgen als zerstörungsfreies Referenzverfahren herangezogen. Die Kombination von digitaler Radiographie und mobiler Blitzröhre wurde angewendet.

Der direkte Vergleich zwischen der Ultraschallecho-Technik und der Durchstrahlung mit Röntgen zeigte eine tendenziell gleichsinnige Schadensortung. Die Ultraschallechomethode war empfindlicher und war deshalb in der Schadensfrüherkennung (z. B. Fäule) den Röntgenverfahren sogar überlegen.

Eine Kombination beider Verfahren ergab, dass eine mögliche Fehldeutung bei Schäden sehr stark reduziert werden konnte. Eine weitere sinnvolle Verfahrenskombination ist eine schnelle Untersuchung großer Bereiche mit dem Ultraschallechoverfahren und eine genaue Überprüfung an auffälligen Punkten mit der zerstörungsarmen Bohrwiderstandsmethode.

Mit der Ultraschallechomethode können von nur einer zugänglichen Bauteilseite aus, auch frühe Schäden schnell und ohne Strahlenbelastung zerstörungsfrei geortet werden.

Somit steht für die zerstörungsfreie Prüfung von Holz ein neues Prüfverfahren zur Verfügung.

Abstract

Wooden construction components bear serious problems, if they hold inner damage (e.g. interior rot) or damage of its surfaces at inaccessible locations. These failures are difficult to recognize from the outside, and might cause sudden malfunction of the structure.

The aim of this work was to develop suitable measurement devices and to carry out investigations under which conditions ultrasonic echo technique can be successfully applied to wooden construction components. A further objective was to examine what kind of damage can be located with ultrasonic echo technique applied from only one accessible surface and if areas of reduced thickness can be determined.

The investigations have shown that ultrasonic echo technique can be used at wooden constructions with longitudinal and transverse waves. For the first time, it was also possible to determine the different speeds of sound in wood for all polarizations and directions with low-frequency ultrasound.

The coupling of the planar longitudinal wave probes (center frequency 100 kHz) required coupling media such as ultrasonic gel and Vaseline. This technique was better suited for smaller specimen with a thickness of less than 10 cm. No coupling media is necessary for the coupling of the transverse wave point contact probes (center frequency 55 kHz). With these probes also structures with larger dimensions could be examined. The use of transverse waves is better suited for several applications and many measurements have been carried out using the TD20 probes.

The tests took place from one accessible side using pulse echo technique. Areas of reduced thickness can often be detected by receiving a direct echo, all other damage, e.g. rot, is indicated by shadowing the echo of the back wall. The sound velocity is calculated from the sound path and the transit time of the signal at an accessible part of the component. The echo impulse received from areas with reduced thickness or cavities can thus be related to a specific depth in the material.

As the reason for the shadowing of the back wall echo is often not known, radiography with x-rays was used as a further non-destructive testing method and as second NDT method in special cases (reference method). A combination of digital radiography and mobile flash tube was also used and optimized for tests on wooden construction components and trees. The direct comparison between ultrasound technique and x-ray showed a trend towards similar detecting of defects. The ultrasound technique was more sensible for early damage detection.

The combination of ultrasonic echo technique and radiography led to a very substantial reduction of possible misinterpretations of damage. Another example for the combination of methods was a fast investigation of large areas with ultrasonic echo technique, followed by an exact investigation at selected points with the minor destructive drilling resistance method.

The research showed that ultrasonic echo applied from an accessible component side (only) permits the direct localisation of areas of reduced thickness, cavities, wooden pegs and large branches. Other damages such as rot or insect attack can be located indirectly by shadowing of the back wall echo.

Thus a new testing method is available now for the non-destructive testing of wooden components.

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

φ	Teilchenauslenkung
θ	Schallausbreitungswinkel
ρ	Dichte
μ	Querdehnzahl
λ	Wellenlänge
c	(Phasen-)Ausbreitungsgeschwindigkeit
D	Durchgangsfaktor
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
I	Schallintensität
p	Schalldruck
R	Reflexionsfaktor
t	Zeit
Z	Schallimpuls, Schall(wellen-)widerstand

Abkürzungen

A1220	Transversalwellenprüfkopf mit 24 Prüfköpfen TD20 (Mittenfrequenz 55 kHz)
A-Bild	Intensität über die Laufzeit bei Ultraschalltechnik
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –Prüfung
B-Bild	Laufzeit über den Messweg bei Ultraschalltechnik
BSH	Brettschichtholz
CT	Computer Tomographie
G0,2 GC	Longitudinalwellenprüfkopf (Mittenfrequenz 100 kHz)
KVH	Konstruktionsvollholz
LIBS	Laser Induzierte Spektralanalyse
MH	Massivholz
MPA	Material-Prüfanstalt
MRT	Magnetresonanz-Tomographie
SAFT	Synthetische Apparatur
SIP	Spektralinduzierte Polarisierung

1 Einleitung

Tagungen wie z. B. das Nachhaltigkeitssymposium in Darmstadt 2004 und Vortragsreihen auf der Bautec in Berlin zeigen, dass auch im Bauwesen der schonende und umweltverträgliche Umgang mit Ressourcen immer mehr beachtet wird. Durch Bauen im Bestand und Umnutzung vorhandener Bausubstanz kann hierfür ein wertvoller Beitrag geleistet werden. Dafür muss die Qualität der vorhandenen Bausubstanz eingeschätzt werden, um dann darauf aufzubauen.

Einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung im Bauwesen leistet die zerstörungsfreie Prüfung, die zur Schadensdiagnose und Bauwerksanalyse eingesetzt wird.

Eine Anwendung dieser Verfahren kann bei Instandsetzungs- oder Sanierungsmaßnahmen zu einer frühzeitigen Schadenserkenkung führen und so die Instandsetzungskosten durch eine schadensorientiertere Sanierungsplanung deutlich reduzieren. Auch die Erhaltungskosten können durch eine Ortung der Schäden im Anfangsstadium deutlich verringert werden.

Für den Einsatz der zerstörungsfreien Prüfverfahren ist die Praxistauglichkeit von entscheidender Bedeutung, die durch eine Weiterentwicklung der zum Teil schon in Laboratorien vorhandenen Verfahren zu technisch ausgereiften Geräten von vielen Forschungseinrichtungen verfolgt wird.

Eine weiterer, nicht minder wichtiger Aspekt für die Anwendung der zerstörungsfreien Verfahren im Bauwesen ist, die Erhöhung des Bekanntheitsgrades und der Akzeptanz der vorhandenen Möglichkeiten. Trotz zahlreicher Veröffentlichungen und Veranstaltungen sind in der Baupraxis die Anwendungsmöglichkeiten und Problemlösungen durch zerstörungsfreie Prüfung kaum bekannt.

Ein im Stahlbau übliches Verfahren zur zerstörungsfreien Überprüfung von Schweißnähten ist die Ultraschallprüfung. Seit einigen Jahren wird diese auch im Niederfrequenzbereich zu Untersuchungen im Bauwesen, vor allem an Beton, angewendet. Durch intensive Forschung ist es inzwischen möglich, mit Ultraschallechotechnik von einer zugänglichen Oberfläche aus die Dicke von Bauteilen, die Lage von Kiesnestern und sowohl die Position als auch den Verpresszustand von Spanngliedern zu bestimmen.

Durch eine sofortige (Vor-)Auswertung der Messungen vor Ort, kann direkt am Bauwerk eine Aussage getroffen werden und diese in die weiteren Untersuchungen einbezogen werden.

An Holz war die Ultraschallecho-Technik bis zu ersten Erfolgen im Rahmen einer Diplomarbeit [HASENSTAB 2002, (2)] nicht möglich. Auf diesen ersten Ergebnissen aufbauend, wurden weitere Untersuchungen an Holz durchgeführt.

Holz ist durch sein häufiges Vorkommen, geringen Preis und seine relativ hohen Festigkeiten, bezogen auf das Eigengewicht, ein sehr verbreiteter Baustoff. Ohne Umwelteinflüsse wie Feuchte und organische Angriffe, ist Holz sehr langlebig und alterungsbeständig.

Durch Feuchteinfluss kann es zu Fäulnis kommen, die als Schadstellen im Inneren der Holzbauteile (z. B. Innenfäule) oder als baulich unzugängliche Oberflächenfäule ein besonderes Problem darstellt, da diese von außen schlecht erkannt werden können. Zudem

können diese bei einer ausgeprägten Schädigung zu einem plötzlichen Versagen des Bauteils führen. Eine Stirnansicht eines geschädigten Balkens (Abbildung 1) und eines schwer geschädigten Baumes (Abbildung 2) verdeutlichen das Problem.

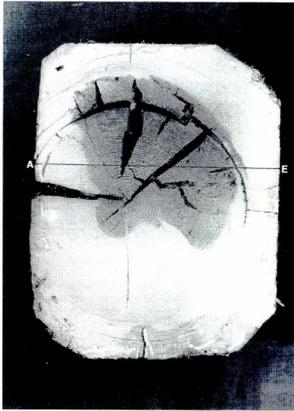


Abbildung 1: Innenfäule bei einem Holzbalken [GÖRLACHER, 1990]



Abbildung 2: Kernfäulnis an einem gefällten Baum am S-Bahnhof Charlottenburg

Für den Tragwerksplaner ist es bei einer Umnutzung der Konstruktion wichtig, möglichst genaue Angaben über die Abmessungen und den Zustand der Bauteile zu erhalten. Die Prüfaufgaben können so in die Integritätsprüfung und die Untersuchung der Bauteilabmessungen eingeteilt werden.

Bei der Integritätsprüfung ist die Lokalisierung von Bereichen mit Fäulnis besonders wichtig die durch Feuchtigkeit im Bauwerk begünstigt wird. So können Feuchteschäden in Form von fehlerhafter Installationen, undichten Sanitärbereichen, defekter Dachhaut und defekter Wasserableitung entstehen. Aber auch bauphysikalische Probleme wie eine Taupunktverschiebung durch eine fehlerhafte bzw. falsche Dampfsperre oder Wärmedämmung, führen zu Durchfeuchtung, was wie beschrieben, Fäulniswachstum begünstigt.

Beim Bauen im Bestand wird die vorhandene Konstruktion weiter genutzt und so ist die Untersuchung der Bauteilabmessungen bei einer Wiederverwendung von ehemals anderweitig genutzten Bauteilen erforderlich. Dies gilt besonders, wenn Aussparungen wie z. B. Verblattung und Zapfenlöchern zu vermuten sind und die Bauteile durch Einbauten nicht allseitig zugänglich sind.

Im Rahmen einer vierwöchigen Hospitation beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege wurde sowohl die Praxisrelevanz verschiedener Prüfverfahren, mögliche Schäden sowie die Messbedingungen untersucht.

Um solche Schäden im Holz festzustellen, stehen eine Reihe von zerstörungsarmen und zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Verfügung.

Gebräuchliche zerstörungsarme Prüfverfahren sind die Bohrwiderstandsmethode (Abbildung 1) sowie die Bohrkernanalyse und Messung des Ausziehwerstandes. Dabei werden bei einer geringen Schädigung des Probekörpers sehr präzise Daten am jeweiligen Messpunkt ermittelt, mit denen auf den Zustand der Konstruktion geschlossen werden kann.

Schwierigkeiten dieser Verfahren sind die zusätzliche Schädigung des Bauteils und die Verallgemeinerung der Prüfdaten auf das Bauwerk.

Von den zerstörungsfreien Prüfverfahren werden zum Auffinden verdeckter Schadstellen bei Holzbauteilen unter anderem Durchstrahlung und Ultraschall verwendet, wobei diese Transmissionsmessungen beidseitige Zugänglichkeit erfordern. Zusätzlich ist beim Einsatz der Durchstrahlungstechnik die Einhaltung der Strahlenschutzvorschriften notwendig.

Ziel der Arbeit ist es, diese Schäden mit dem zerstörungsfreien Verfahren Ultraschallecho zu detektieren. Dafür sollen auch die Randbedingungen für die Anwendbarkeit durch Untersuchungen des Holzaufbaus, der akustischen Anisotropie, verschiedener Bauteile und Schäden untersucht werden.

Der entscheidende Vorteil des Ultraschallecho-Verfahrens ist, dass nur eine zugängliche Bauteilseite für Messungen erforderlich ist und so ein breites Anwendungsspektrum zur Verfügung steht. Zudem ist mit dem Ultraschallecho-Verfahren durch die Messungen senkrecht zur Bauteilachse eine höhere Ortsauflösung der Schädigung als bei Transmissionsmessungen möglich.

Die Ultraschallechotechnik könnte also eine wichtige Lücke in der zerstörungsfreien Prüfung an Holz schließen.

2 Fragestellung und Aufbau

Die Kernfrage der Arbeit war, in wie weit sich die Ultraschallecho-Technik für den Einsatz an Holz eignet. Daraus ergaben sich folgende Fragen:

- Lässt sich die aus der Anwendung an Beton bekannte niederfrequente Ultraschalltechnik auf Holz übertragen?
- Lassen sich die vielversprechenden Ergebnisse mit Longitudinalwellen aus den Vorversuchen weiter ausbauen?
- Was ist der Stand der aktuellen Forschung?
- Welche Technik eignet sich?
- Sind neben den Longitudinalwellen auch die Transversalwellen geeignet?
- Welche Besonderheiten sind am Werkstoff Holz zu beachten?
- Beeinflusst die Holzanatomie die Messungen?
- Welche Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens gibt es?
- Können Schadstellen erkannt werden?
- Welche Prüfaufgaben können gelöst werden?

Nach Klärung der grundlegenden Punkte rücken weitere Fragen in den Vordergrund:

- Mit welchen zerstörungsarmen oder zerstörungsfreien Prüfverfahren können die Ergebnisse der Ultraschallechomessungen verifiziert werden?
- Ist eine Verfahrenskombination mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren sinnvoll?
- In wie weit ist der Einsatz der neuen Technik in der Praxis denkbar?
- Welche Verfahren bieten sich an, wenn die Ultraschallecho-Technik nicht möglich ist?

Aus der Fragestellung ergab sich folgender Aufbau der Arbeit:

Zum Beginn der Arbeit wird in Kapitel 3 der Werkstoff Holz und die Schadensmechanismen, die zu den gesuchten, verdeckten Schadstellen führten, erläutert.

Daran anschließend werden im Kapitel 4 zerstörungsarme und zerstörungsfreie Prüfverfahren aufgeführt, mit denen bisher versucht wird, die verdeckten Schadstellen zu finden. Die in der Arbeit verwendeten Verfahren Bohrwiderstandsmessung, Durchstrahlungsmessung und Ultraschall werden umfangreich behandelt. Ein Schwerpunkt liegt auf der Recherche des bisherigen Forschungsstandes mit der Ultraschalltechnik an Holz.

Danach folgen in Kapitel 5 die erforderlichen Grundlagen und Gleichungen zur Ultraschalltechnik sowie deren Darstellungsformen. Die Aspekte der Schallausbreitung in Holz und die Auswirkungen durch die Anisotropie und deren Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit werden ebenso behandelt, wie die Schallübergänge an praxisrelevanten Grenzflächen.

In Kapitel 6 werden Aufbau und Optimierung der Messapparatur und die Prüfkopfanzordnung beschrieben. Auf das Vorkapitel aufbauend werden Einflüsse durch die Holz Anatomie und Wellenart auf die Schallgeschwindigkeit von niederfrequentem Ultraschall untersucht. Auch lauffzeitkorrigierte Überlagerung und Rekonstruktionsrechnung sowie eine Ankopplung über Luft in Transmissionstechnik wurden versucht.

Die Ergebnisse der Echomessungen werden in Kapitel 7 vorgestellt. Dabei werden die Möglichkeiten und Grenzen der Ultraschallechotechnik gezeigt und die beiden Wellenarten anhand mehrerer Beispiele verglichen.

In Kapitel 8 wird das zerstörungsfreie Prüfverfahren Röntgen beschrieben, mit dem die Bereiche untersucht und verifiziert werden können, bei denen mit Ultraschallecho Schädigungen vermutet wurden.

Die Praxisanwendung der Ultraschalltechnik und die Kombination mit anderen Verfahren wie der Bohrwiderstandsmethode und Röntgenstrahlung wird in Kapitel 9 beschrieben. Dabei wurden großformatige Bauteile mit unterschiedlichen Schädigungen und verschiedenen Minderdicken sowohl in Bauwerken als auch im Labor untersucht. An einem Baumstamm wurde spektral induzierter Polarisation, Impulsschall und Röntgenstrahlung angewendet.

Abschließend werden in Kapitel 10 die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und die praktischen Anwendungsbereiche und Grenzen der verwendeten Verfahren aufgezeigt.

Eine Auflistung der Kontakte und Versuchskörper befindet sich im Anhang. Weiter werden dort die systematischen Röntgenexperimente an Holz und die Beispiele der Praxismessungen ausführlich beschrieben.

3 Werkstoff Holz und Schadensmechanismen

In dem folgenden Kapitel wird der Werkstoff Holz mit seinen Besonderheiten sowie die unterschiedlichen Schadensmechanismen erklärt, die zu den gesuchten verdeckten Schadstellen führen können.

3.1 Werkstoff Holz

Holz ist ein weit verbreiteter natürlicher Werkstoff, der sehr leicht zu bearbeiten ist. Durch seine relativ hohe Festigkeit bezogen auf das geringe Eigengewicht und das große Angebot, ist Holz ein sehr beliebter Baustoff. Als typisches Bauholz können die Laubhölzer Eiche und Buche und die Nadelhölzer Fichte und Kiefer angesehen werden.

Oft werden an Bauholz im sichtbaren Bereich höhere Ansprüche wie gute Verarbeitung durch Hobeln, Egalisieren und Fasen sowie eine Holzfeuchte um 15 % gestellt. Dies wird von Konstruktionsvollholz (KVH) und Massivholz (MH) erfüllt, wobei letzteres keine Keilzinkenverbindungen besitzt. Hohen Bekanntheitsgrad besitzt das sehr formstabile und weitgehend rissminimierte Brettschichtholz, aus dem neben geraden auch gekrümmte Bauteile mit variablem Querschnitt mit Bauteilhöhen über einen Meter hergestellt werden können. Verwendung findet es im Wohnungsbau und für Bauwerke mit großen Spannweiten wie Hallen und Brücken.

Das Brettschichtholz (auch BS-Holz oder BSH) besteht aus mindestens drei faserparallel miteinander verklebten, getrockneten Brettern aus Nadelholz. Infolge der Festigkeitssortierung des Ausgangsmaterials und der Homogenisierung im Bauteil, kann durch den schichtweisen Aufbau eine höhere Tragfähigkeit gegenüber üblichem Bauholz erreicht werden. Neben dem BSH gibt es seit einigen Jahren auch Duo- und Triobalken, die aus zwei bzw. drei faserparallel miteinander verklebten Kanthölzern bestehen. Der Herstellungsprozess entspricht dem von BSH, wobei größere Einzelquerschnitte miteinander verklebt werden.

Aufgrund seines Aufbaus und seiner Struktur unterscheidet sich Holz von allen anderen Werkstoffen. Im folgenden Kapitel werden die Besonderheiten und Werkstoffeigenschaften von Holz grob erläutert.

3.1.1 Makroskopischer Aufbau

Kern-Splint

Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt eines Föhrenstamms, bei dem der bei vielen Hölzern übliche dunkle innere Kern von einem hellen äußeren Bereich, dem Splint umgeben ist. Der dunkle Kern besteht aus abgestorbenem, verharztem Gewebe, der helle Splint aus totem Gewebe und wasserführenden Markstrahlen. Durch die Einlagerung von sekundären Pflanzeninhaltsstoffen sind die Rohdichte und die Festigkeit des Kernholzes höher als die des Splintholzes. Bei einigen Holzarten ist auch die Resistenz des Kernes gegenüber Insekten und Pilzen, bedingt durch die Einlagerung von natürlichen Insektiziden und Fungiziden, höher.

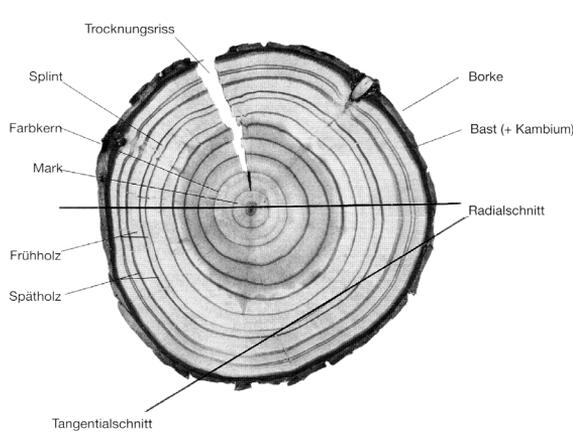


Abbildung 3: Querschnitt durch einen Föhrenstamm
[SUTTNER, 2002]

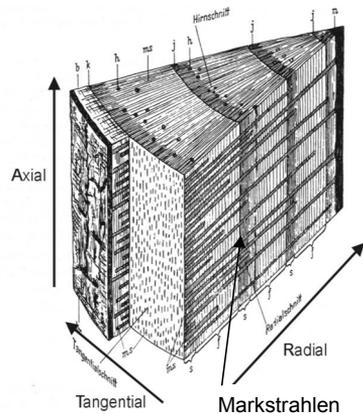


Abbildung 4: Radial- und Tangentialschnitt einer vierjährigen Kiefer
[KOLLMANN, 1951]

In der Praxis werden Hölzer in Kernholzart, Reifholz- und Splintholzart unterschieden. Nach [TRENDELENBURG, 1955] hat beispielsweise Lärche einen Unterschied zwischen der Dichte im Kern von 0.54 g/cm^3 zu $0,50 \text{ g/cm}^3$ im Splint. Bei Fichte und Tanne hingegen ist kein Unterschied festzustellen. Durch Einlagern von sekundären Pflanzeninhaltsstoffen ist bei Farbkernhölzern die Rohdichte des Kerns erhöht.

Abbildung 4 zeigt, dass sich der Aufbau von Holz in drei Richtungen, bezogen auf die Wuchsrichtung, unterscheidet. Die Faserrichtung wird als axial oder longitudinal bezeichnet, als radial die Richtung senkrecht zur Stammachse und den Jahrringen und als tangential die Richtung parallel zu den Jahrringen. Durch den Aufbau des Holzes aus Fasern kommt es zu einer eindeutigen axialen Ausrichtung des Holzes, was für die Schallausbreitung sehr wichtig ist. Zusätzlich haben die Jahrringe und Markstrahlen, welche die Jahrringe verbinden, auf die Schallausbreitung eine große Bedeutung (siehe Kapitel 5.3.1).

Jahrringe

Die Jahrringe bestehen aus Frühholz geringer Dichte mit weitlumigen, dünnwandigen Zellen und Spätholz hoher Dichte (Abbildung 5) mit englumigen, dickwandigen Zellen, welche am Ende der Vegetationsperiode produziert werden.

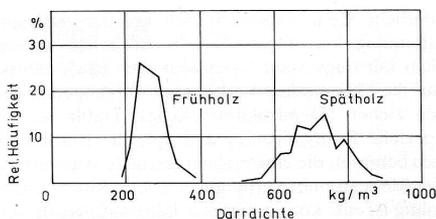


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Darrdichte von Früh- und Spätholz der Douglasie nach Knigge und Schulz
[SIAU, 1984]

Durch den Wechsel von Früh- und Spätholz entsteht die typische Jahrringstruktur, die Aussagen über klimatische Bedingungen und Umwelteinflüsse zulässt. In der

Dendrochronologie (Baumringchronologie) werden die unterschiedlichen Jahrringbreiten zur Altersbestimmung der Hölzer genutzt.

Allgemein ist noch zu ergänzen, dass die Jahrringe bei Nadelholz und ringporigen Laubhölzern gut sichtbar, bei zerstreutporigen Laubhölzern weniger deutlich sind. Zudem bedeutet ein höherer Anteil an Spätholz eine höhere Dichte des Holzes, was sich in einer höheren Festigkeit widerspiegelt.

Dendrochronologie

Die Dendrochronologie (aus dem Altgriechischen: Dendron = Baum, Chronos = Zeit, Logos = Lehre) ist eine Datierungsmethode, mit der präzise und jahrringgenau über den Vergleich der Jahrringfolgen eine zeitliche Zuordnung der untersuchten Hölzer möglich ist.

Dies geschieht über den Vergleich der Jahrringmuster des untersuchten Holzes mit Mittelwerten aus bereits datierten Proben.

Die Methode wird sowohl zur Datierung historischer Holzproben in der Archäologie, Bau- und Kunstgeschichte als auch zur Jahrringanalyse zur Untersuchung ökologischer Probleme (Dendroökologie) eingesetzt. Diese Untersuchungen werden beispielsweise am Dendro-Institut Tharant an der Technischen Universität Dresden, an der Universität Hamburg, am Deutschen Archäologischen Institut Berlin und beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in Thierhaupten durchgeführt.

Die praktische Anwendung des Verfahrens wird beispielsweise von [CRAMER, 1993] beschrieben, die Erkennungsverfahren (Crossdating) zur Jahrringdatierung und verbesserte mathematische Ansätze für das Crossdating können bei [WENK, 1997] nachgelesen werden. Ob die Auflösung der digitalen Flachdetektoren bei tangentialen Röntgenaufnahmen hoch genug ist, wird derzeit an der BAM untersucht (Kapitel A.3.3). Bisherige Untersuchungen ergaben durch eine zu geringe Auflösung nicht die erforderliche Ergebnisgenauigkeit.

3.1.2 Mikroskopischer Aufbau

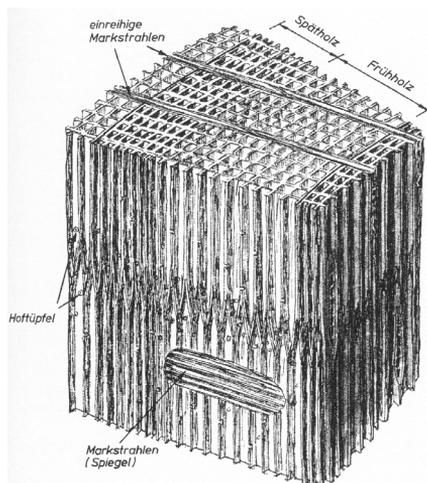


Abbildung 6: Ein Jahrring einer Kiefer (etwa 15 fach) [GLINSKI, 1991]

Der mikroskopische Aufbau von Holz kann an Hand einer etwa 15fachen Vergrößerung eines Jahrrings einer Kiefer (Abbildung 6) gut erkannt werden. Wichtig ist, dass die Mehrzahl der Holzzellen parallel zur Stammachse (axial) faserförmig nebeneinander liegen und so einen anisotropen Werkstoff bilden. Laubholz ist ebenfalls anisotrop, aber durch seine spätere evolutionäre Entwicklung im Detail anders strukturiert. Weiterführendes kann [SUTTNER, 2002] entnommen werden.

3.1.3 Chemische Zusammensetzung

Die chemischen Zusammensetzung von Holz variiert je nach Holzart. Holz besteht nach [SUTTNER, 2002] in Masseprozent zu

- 40 bis 50 % aus Zellulose, (Gerüst des Holzes, aus kettenartigen Kohlenhydraten aufgebaut, kristalliner Teil),
- 15 bis 35 % aus Holzpolyosen (Hemizellulose, eine relativ unstrukturierte, leicht von Schädlingen angreifbare Gerüstsubstanz),
- 20 bis 35 % aus Lignin (amorpher Teil), der Kittsubstanz die die Zellfasern zusammenhält und zu
- 1 bis 4 % aus sonstigen Holzinhaltsstoffen, wie Begleit- oder Extraktstoffe. Diese können entweder für Schädlinge in Form von Proteinen und Stärke anziehend sein oder beispielsweise als Ablagerungen im Kernholz vor Insekten und Pilzen schützen.

3.1.4 Physikalische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften Dichte und Holzfeuchte sind für die Festigkeit von Holz von großer Bedeutung.

Dichte

Holz ist ein poröser Werkstoff, was bedeutet, dass sich trotz einer ähnlichen Reindichte (ohne Porenraum) des Holzes von ca. 1,52 - 1,55 g/cm³ [ROEMPP, 2004] die Rohdichte (einschließlich Porenraum) von verschiedenen Holzarten stark unterscheiden kann. Neben den unterschiedlichen Dichten bei verschiedenen Holzarten kann es auch zu Schwankungen der Dichte innerhalb einer Holzart kommen. Beispielsweise schwankt die Dichte bei Lärche im Verhältnis von etwa zwei zu eins und bei Kiefer etwa um drei zu eins (Tabelle 1).

Diese Schwankungen der Dichte sind genetisch bedingt, schwanken innerhalb eines Baumes und werden durch Klima und Standortsbedingungen beeinflusst ($\rho_{\text{Wurzelsatz}} > \rho_{\text{Spitze}}$, $\rho_{\text{Astansatz}} > \rho_{\text{Astspitze}}$). Dennoch kann angenommen werden, dass die Dichteschwankungen in einem Holzbalken bis auf lokale Stellen wie Äste und Astansätze gering sind. Auf eine Untersuchung mit einer radialen Messrichtung haben die Dichteunterschiede nur einen lokalen Einfluss auf wenige Messpunkte.

Die Druck-, Zug- und Biegefestigkeit von Holz sind nach Niemz [NIEMZ, 1993] proportional zur Rohdichte was auch in der neuen Holznorm DIN 1052 berücksichtigt wird. So kann bei den meisten zerstörungsarmen und zerstörungsfreien Prüfverfahren (z. B.

Bohrwiderstandsmethode, Durchstrahlungsprüfung) aus den indirekten Ergebnissen eine Aussage über die Holzqualität abgeleitet werden.

Tabelle 1: Rohdichten einiger Hölzer [KNIGGE, 1966]

Holzart	Darrdichte in kg/m ³		Raumdichtezahl in kg/m ³
	\bar{x}	x_{\min}, x_{\max} Grenzwerte	
Balsa	130	70 ... 230	121
Tanne	370	310 ... 460	339
Fichte	420	280 ... 610	332
Pappel	370	270 ... 650	377
Douglasie	470	360 ... 630	412
Kiefer	490	300 ... 860	431
Lärche	550	400 ... 820	487
Ahorn	590	480 ... 750	522
Rüster	640	440 ... 820	556
Esche	650	410 ... 820	564
Eiche	640	380 ... 900	561
Pockholz	1230	1200 ... 1320	1045
Rotbuche	660	540 ... 840	554

Holzfeuchte

Holz ist ein hygroskopischer Werkstoff, d. h. Holz absorbiert Wasser aus seiner Umwelt und lagert es zwischen den Zellulosefäden ein. Dabei sinkt die Festigkeit des Holzes mit der Menge des aufgenommenen Wassers [SCHOLZ, 1999] ebenso wie die Schallgeschwindigkeit [KABIR, 1998].

Die Holzfeuchte kann direkt mit der Darrmethode, dem Widerstandsmessverfahren, dem Mikrowellenverfahren, und indirekt über die relative Luftfeuchte und die Temperatur bestimmt werden. Zur Abschätzung der Holzfeuchte der verwendeten Probekörper wurde die Rammelektrode (siehe Kapitel 4.1.2) eingesetzt, die nach [SUTTNER, 2002] im Bereich von 7 bis 25 % eine Genauigkeit von +/- 1,5 % besitzt und somit für die Erfordernisse ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

Bei gleichbleibenden Umgebungsbedingungen kann die Holzfeuchte über die Ausgleichsfeuchte bestimmt werden, da sich in Holz bei einer bestimmten äußeren Feuchte und Temperatur eine bestimmte innere Feuchte einstellt. So stellt sich bei Normalklima, 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte, eine Holzfeuchte von 12 % ein [HALASZ, 1986].

3.1.5 Inhomogenitäten im Holz wie Risse, Äste und Wuchsfehler

Fast alle Holzteile haben Wuchsfehler oder werden durch äußere Einwirkungen im Zeitraum vor oder nach dem Einschlag inhomogen. Als Inhomogenitäten bezeichnet man Risse, Äste und Wuchsfehler.

Besonders häufig sind **Risse**, die in Schwindrisse, Kernrisse und Ringrisse unterteilt werden (Abbildung 7).



Abbildung 7: Rissarten des Holzes [SCHÄFFLER, 1996]

Die **Trocknungs-** oder **Schwindrisse** (Abbildung 7a) entstehen durch das Feuchtigkeitsgefälle beim Trocknen von außen nach innen in Kombination mit dem unterschiedlichen Schwindverhalten des Holzes. Aus dem unterschiedlichen Schwindverhalten resultieren Zugspannungen an der Holzoberfläche welche beim Überschreiten der zulässigen Zugspannungen zu Rissen führen, die von außen nach innen verlaufen.

Die **Kern-** oder **Sternrisse** entstehen bald nach dem Einschlag am Stammende und klaffen von innen nach außen (Abbildung 7b).

Schälrisse oder **Ringklüfte** sind umlaufend, den Jahrringen folgend (Abbildung 7c) und werden von Ring- oder Wundfäule oder unregelmäßigen Jahrringbreiten verursacht. Durch starke Abkühlung und Blitzschlag entstehen **Frostrisse** und **Blitzrisse** mit einem Rissverlauf von der Rinde radial in das Innere. Bis zu welchem Grad Trockenrisse bei Bauholz tolerierbar sind, wird in einem Sonderdruck des Informationsdienstes Holz [EGH, 1987] behandelt. Nicht tolerierbar sind **Kern-** und **Ringrisse**, diese haben zur Folge, dass geschädigtes Holz nicht verbaut werden darf und verbautes Holz ausgetauscht werden muss [MÖNK, 1999, SCHOLZ, 1999].

Äste

Äste entstehen beim normalen Wuchs der Bäume und lenken die Holzfasern ab, was beim Sägen des Stammes ein Durchtrennen der Fasern bedeutet. Lose Äste und Astlöcher können wie Löcher im Holz behandelt werden und verursachen am Bauteil eine Querschnittreduzierung.

Wuchsfehler

Unter Wuchsfehler wird ein Abweichen des Holzes vom geraden, symmetrischen Wuchs des Stammes verstanden, wie z. B. Abholzigkeit, womit ein Abweichen des Baumes von der Zylinderform gemeint ist. Ferner gibt es Krümmung, Drehwuchs d. h. ein schraubenförmiger Faserverlauf, Druckholz und Mistelbefall.

3.2 Schadensmechanismen

Als Schadensmechanismen werden alle Mechanismen verstanden, die chemisch, physikalisch oder biologisch den Werkstoff Holz angreifen und die Beanspruchbarkeit des Holzes beeinträchtigen können.

Da unerkannte, nicht sichtbare, innenliegende oder verdeckte Schäden ein besonderes Problem darstellen, wird in dieser Arbeit auf die von der Oberfläche wirkenden chemischen und thermischen Angriffe verzichtet. Genaueres hierzu kann der Literatur entnommen werden [ERLER, 1993, ERLER, 1998, HASENSTAB, 2002].

Durch seine organische Zusammensetzung ist Holz besonders gegenüber biologischen Schadensmechanismen wie Insekten und Pilze gefährdet, die die Festigkeiten herabsetzen können [GLOS 1989 (1), GLOS 1989 (2)]. Nach einer umfangreichen Auswertung von Schäden durch [SCHULZE-DEWITZ, 1985] gehen etwa ein Drittel der Schäden an Holz in Hochbauten von Insekten aus, zwei Drittel von Pilzen.

Insekten befallen das Bauteil meist von der Oberfläche und zernagen die Holzsubstanz. Pilze hingegen können das Bauteil in noch kürzerer Zeit durch Innenfäule völlig zersetzen und ein Versagen des Bauteils ohne vorherige Anzeichen verursachen. Da von den Pilzen ein größeres Gefährdungspotential ausgeht, wird im folgenden Abschnitt nach den holzerstörenden Insekten und den holzerstörenden Meerestieren eine besondere Betonung auf die holzerstörenden Pilze gelegt.

Eine gute Zusammenstellung von Schäden an Holzbauteilen in Bauwerken kann weiterführender Literatur entnommen werden [BLAICH, 1999, MÖNK, 1999, COLLING, 2000].

3.2.1 Holzerstörende Insekten

Die Zerstörung des Holzes durch Insekten wird durch die Larven der Käfer (*Coleoptera*) verursacht. Dabei perforieren die Larven das Holz mit ihren Fraßgängen, die beim Hausbock Durchmesser bis zu 7 mm erreichen und verwandeln einen Großteil des Holzes in Bohrmehl und Kotwalzen.

Die Insekten werden in Trockenholzinsekten, Frischholzinsekten (z. B. Borkenkäfer) und Faulholzinsekten (z. B. Mulmbock) unterteilt, wobei die beiden letztgenannten Gruppen für verarbeitetes Holz unbedeutend sind. Einige weit verbreitete Trockenholzinsekten, welche sich sowohl in ihren Fraßgewohnheiten im Holz als auch in den optimalen Entwicklungstemperaturen unterscheiden, werden im folgenden Text beschrieben:

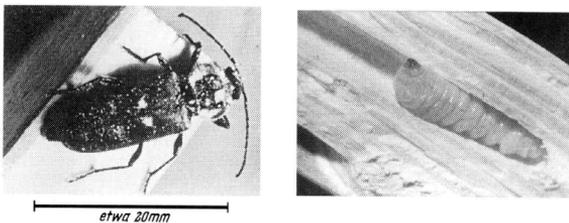


Abbildung 8: Hausbockkäfer, Weibchen, Larve (Länge 15 – 30 mm) [SCHOLZ, 1999]

Nadelhölzer werden z. B. vom Hausbock (*Hylatrupes bajulus*, Abbildung 8) bevorzugt, der sich bei einer optimalen Entwicklungstemperatur von 28 – 30 °C vom Eiweißanteil des Holzes ernährt. Hingegen lebt der gewöhnliche Nagekäfer (*Anobium punctatum*) von Laub- und Nadelholz besonders gut bei 22 °C und verdaut sowohl Eiweiß als auch Zellulose. Die Splintholzkäferlarve (*Lyctus brunneus*) ernährt sich vom Eiweiß und der Stärke von Laubhölzern.

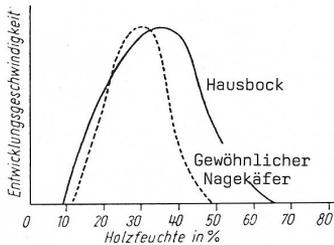


Abbildung 9: Abhängigkeit der Entwicklungsgeschwindigkeit von Hausbock und Gewöhnlichem Nagekäfer von der Holzfeuchte [KEMPE, 1999]

Abbildung 9 zeigt, dass die Entwicklungsgeschwindigkeit von Hausbock und Gewöhnlichem Nagekäfer in trockenem Holz sehr gering ist, was bedeutet, dass im allgemeinen Schäden an trockenem Holz in Bauwerken durch Insekten sehr selten sind.

Dennoch kann nach [KEMPE, 1999] entgegen dieser weitverbreiteten Meinung auch trockenes und altes Holz befallen werden. Besonders gefährdet ist aber neues Holz, welches oft von jungen Bäumen mit hohem nährstoffreichen Splintanteil stammt und so besonders Insekten anlockt. So können auch Splintholzkäfer bei Balken mit geringem Kernholzanteil schnell das Bauteil statisch gefährden. Dass der Hausbock ein aktuelles Problem ist, zeigt ein Artikel im Immobilienteil einer Tageszeitung [BERLINER ZEITUNG, 2004]. So kann der Hausbock das befallene Holz bis auf den Kern völlig zerstören. Da er etwa 12 Jahre als Larve im Holz lebt und erst mit kleinen Ausflugsöffnungen die Bauteiloberfläche durchstößt, kann er sehr lange unbemerkt bleiben und so erheblichen Schaden anrichten.

Einrichtungsgegenstände und Kunstobjekte wie Skulpturen, Schnitzwerk, Möbel und Musikinstrumente befällt an erster Stelle der gewöhnliche Nagekäfer, wobei er bei hoher Luftfeuchtigkeit auch Dachkonstruktionen zerstört.

Besonders fatal für Bauwerke ist ein kombinierter Befall von Pilzen und Insekten, denn nach einem Pilzbefall ist das Kernholz auch für Käfer genießbar und so ist auch eine Zerstörung des Kerns durch Käfer möglich.

Weitere Details können der Literatur [KEMPE, 1999, SUTTNER, 2002] entnommen werden.

3.2.2 Holzerstörende Meerestiere

Neben den holzerstörenden Insekten gibt es eine weitere Gruppe von Tieren, die erheblichen Schaden anrichten kann – die holzerstörenden Meerestiere. Im Salzwasser über 15 ‰ Salzgehalt lebt die Bohrrassel und bei etwa 7 ‰ Salzgehalt (Nordsee und westliche Ostsee) lebt die Schiffsbohrmuschel [KEMPE, 1999]. Die Schäden, die die Bohrrassel verursacht sind mit 6 - 12 mm Holzabtrag im Jahr hoch, aber von außen sichtbar.

Nicht sofort offensichtliche Schäden an Pfählen, Booten, Bühnen, Brücken und Hafenanlagen werden von den Schiffsbohrmuscheln (*Teredo navalis*, auch Bohrwurm oder

Pfahlwurm) verursacht. Die Schiffsbohrmuschel raspelt Bohrgänge mit Durchmessern von bis zu 12 mm in das Holz und kleidet die Wandungen mit weißem Kalk aus. Die Holzkonstruktionen werden äußerlich nicht sichtbar vollständig durchlöchert und zum Einsturz gebracht. Dabei wird im Gegensatz zu den Insekten sowohl Kern als auch Splint von Laub- und Nadelhölzern befallen.

3.2.3 Holzerstörende Pilze

Pilze sind überall in der freien Natur vorhanden und kommen deshalb auch in Gebäuden vor. Wie aus Abbildung 10 ersichtlich, können Pilze nach ihrem Schadensbild eingeteilt werden. Neben den holzverfärbenden Pilzen, den Schimmel- und Bläuepilzen, welche Hemizellulose abbauen, gibt es die Moder-, Braun- und Weißfäule.

Als Entwicklungsvoraussetzungen für Pilze ist eine Infektion des Holzes durch Sporen notwendig, was bautechnisch nicht vermeidbar ist. Zusätzlich muss ein Angebot an Nährstoffen in Form von Holz, Holzwerkstoffen oder holzartiger Stoffen wie Papier und Sauerstoff sowie eine hohe Holzfeuchte (> 20 %) vorhanden sein. Genaue Angaben zum Feuchte- und Temperaturanspruch der Pilze und zur Häufigkeit des Auftretens von Pilzen und Insekten im Bauwerk kann [KEMPE, 1999] entnommen werden.

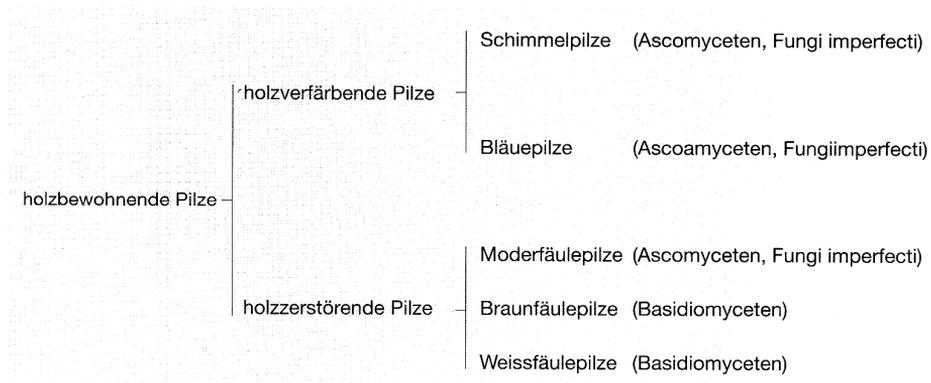


Abbildung 10: Einteilung der holzbewohnenden Pilze nach ihrem Schadensbild [SUTTNER, 2002]

Die Hauptgefahr durch Pilze geht von dem extremen Festigkeitsabfall des Holzes in kurzer Zeit aus. So kann nach Abbildung 11 beim Echten Hausschwamm (*sacria lacrimans*) in nur drei Monaten die Druckfestigkeit um 80 % abfallen.

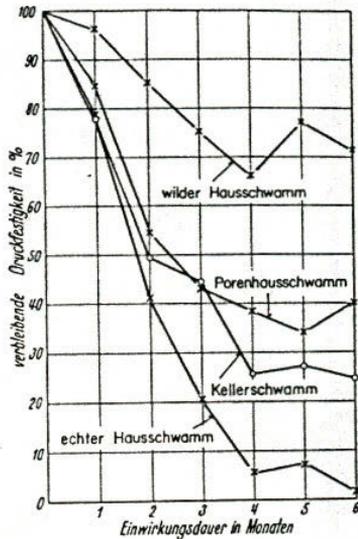


Abbildung 11: Festigkeitsabfall bei Pilzbefall [KOTHE, 1998]



Abbildung 12: Echter Hausschwamm [LASSOE, 1997]

Zum besseren Verständnis werden die holzerstörenden Pilze, die Moderfäule, die Braunfäule und die Weißfäule kurz erläutert.

Moderfäule baut Zellulose ab und kommt im Erdboden und in der Erd- Luftzone, d. h. in Bereichen hoher Feuchte, vor.

Braunfäule (Destruktionsfäule) ist nach [SUTTNER, 2002] im Innenbereich die wichtigste Form der pilzbedingten Zerstörung. Hier wird die Zellulose auf enzymatischem Weg von den Zellhohlräumen, d. h. von den Markstrahlen, den Lumen und den Harzgängen ausgehend abgebaut, wobei das Lignin teilweise erhalten bleibt, was zu einer Braunfärbung des Holzes führt. Befallenes Holz weist tiefe Risse (Würfelbruch) auf und es kommt zur Abnahme der Rohdichte und Festigkeit des Holzes. Folgend einige Namen der Braunfäulepilze nach [KEMPE, 1999]: Sägeblättling, Eichenwirrling, Muschelkempling, Tannen-/ Zaunblättling, Porenschwämme, Brauner Keller- /Warzenschwamm, Echter Hausschwamm.

Weißfäule (Korrosionsfäule) baut hauptsächlich Lignin ab und hinterlässt weitgehend die weiße, fasrige Zellulose. Die Weißfäule ist in der Schweiz nach [SUTTNER, 2002] von untergeordneter Bedeutung. Von den Vertretern der Weißfäule wie z. B. der Spaltblättling, der Echte Zunderschwamm, der Schmettlingsporling, der Eichenporling, der Wurzelschwamm und der Kiefernbaumschwamm (*Trametes pini*) ist der letzt genannte in den Kiefernwäldern Norddeutschlands vertreten.

Der echte Hausschwamm (*Serpula lacrinans*) ist nach [SUTTNER, 2002] die wichtigste holzerstörende Pilzart an verbauten Gebäuden in der Schweiz und hat vermutlich auch in Deutschland und Österreich einen ähnlichen Stellenwert. Der Pilz befällt besonders Nadelholz und zeichnet sich gegenüber allen Braunfäulepilzen dadurch aus, dass er durch ein Strangmyzel (bis 4 m) Wasser und Nährstoffe transportiert und so auch entferntes, trockenes Holz befallen kann.

Auch der Kellerschwamm oder braune Warzenschwamm (*Coniophora puteana*) hat ein sehr hohes Schadenspotential, was aber von „natürlicher“ Feuchtigkeitzufuhr abhängig ist.

Für die Sicherheit von Gebäuden bergen Pilze (z. B. Moderfäule) die Gefahr, dass sich ein bevorstehender Bruch nicht durch vorherige Rissbildung oder Deformation ankündigt, sondern abrupt geschieht. Auch die Innenfäule stellt ein großes Problem dar, da es zu einer sehr fortgeschrittenen Zerstörung kommen kann, ohne dass dies äußerlich an der Konstruktion zu erkennen ist. Nach [KEMPE, 1999] wird die Innenfäule z. B. von folgenden Braurfäulepilzen verursacht: Sägeblättling, Tannenblättling, Brauner Keller- oder Warzenschwamm.

Ein Problem bei der Reparatur ist zudem, dass der Pilzbefall lange Zeit kaum sichtbar ist, aber dennoch die Festigkeit des Holzes stark herabsetzt und leicht übersehen werden kann. Aus diesem Grund ist nach DIN 68800 Teil 4 über den sichtbaren Schadensbereich hinaus noch Substanz zu entfernen (etwa ein bis eineinhalb Meter.)

Fazit:

Unabhängig von der Schädlingsbekämpfung müssen für eine weitere Nutzung der Baukonstruktion die Restquerschnitte zerstörungsarm oder zerstörungsfrei bestimmt werden, um eine realitätsnahe Einschätzung der Tragfähigkeit vornehmen zu können.

Das gewünschte Ziel, eine verdeckte Schädigung, wie eine Innenfäule, zu detektieren, konfrontiert Ingenieure mit einer anspruchsvollen Aufgabe. Mit Hilfe der zerstörungsarmen und zerstörungsfreien Prüfverfahren sollen hierfür Möglichkeiten aufgezeigt werden.

4 Stand der Technik der Prüfung von Holz

Wenn Holz auf Schäden und Fehler hin untersucht wird, erfordert dies mehr oder weniger aufwendige zerstörungsarme oder zerstörungsfreie Prüfverfahren. Erforderlich sind die Untersuchungen meist bei Restaurierungen und Umnutzungen von Bauwerken, da auf die bestehenden Holzkonstruktionen die geltenden Normen angewendet werden müssen und dafür die Bauteile oft bewertet werden müssen.

Umfangreiche Untersuchungen ergaben übereinstimmend, dass ungeschädigtes, altes Konstruktionsholz sehr ähnliche Festigkeitswerte wie neues Konstruktionsholz aufweist [WALTHELM, 1988, RUG, 1989, EHLBECK, 1990, DEPPE, 1993].

Ein besonderes Augenmerk verdient die Ortung von verdeckten Hohlstellen und Innenfäule, da diese die Standsicherheit stark mindern können und nicht augenscheinlich sind.

Folgend sind einige Prüfverfahren aufgeführt, mit welchen es unterschiedlich gut möglich ist, diese Schäden zu orten (Stand: April 2005). Die Untersuchungsverfahren werden in zerstörungsarme und zerstörungsfreie Prüfverfahren unterteilt, wobei erstgenannte bei der Untersuchung am Bauwerk nur geringe Schäden, die zerstörungsfreien Prüfverfahren hingegen keine Schäden hinterlassen.

4.1 Zerstörungsarme Prüfverfahren

Mit zerstörungsarmen Prüfverfahren wird versucht, möglichst aussagekräftige Messwerte bei einer möglichst geringen Materialschädigung zu erlangen. Sie sind häufig in der Anwendung und Auswertung leicht zu handhaben, liefern aber nur Informationen für den jeweiligen Messpunkt und erfordern für die folgende Verallgemeinerung der Aussage für das gesamte Bauteil ein großes Fachwissen. Sehr gut sind die zerstörungsarmen Verfahren, wie z. B. die Bohrwiderstandsmethode, zur Kalibrierung der zerstörungsfreien Prüfverfahren geeignet.

4.1.1 Untersuchung des Penetrationswiderstandes

Nagelprobe

Diese einfachste und schnellste Untersuchung kann mit einem Nagel, Stichling oder sonstigem spitzen Werkzeug von der Holzoberfläche aus durchgeführt werden und ist bei Zimmermännern ebenso wie bei Holzschutzsachverständigen gebräuchlich. Ist ein Eindringen des Nagels ohne Widerstand möglich, erfüllt das Holz die Anforderungen des Tragwerksplaners an das Konstruktionsholz nicht. Oberflächliche Schädigung kann so leicht abgegrenzt werden und gegebenenfalls weitere Untersuchungen eingeleitet werden.

Penetrationsanalyse

Etwas detailliertere Aussagen über den Eindringwiderstand können mit der Penetrationsanalyse gemacht werden. Dabei wird ein Metallstift oder Stahlröhrchen mit einem Durchmesser von zwei bis drei Millimeter mit konstanter Energie in den Probekörper geschlagen und die Einschlagtiefe des Stiftes in das Holz pro Schlag gemessen.

Umfangreiche Untersuchungen wurden von [GÖRLACHER, 1987] mit dem Schweizer Gerät Pilodyn der Firma Proceq durchgeführt.

Ausziehwiderstandsmessung

Bei der Ausziehwiderstandsmessung wird die Kraft gemessen, die benötigt wird, um eine Schraube aus dem Holz zu ziehen. Untersuchungen zur Ausziehwiderstandsmessung können [GÖRLACHER, 1990 (2)] entnommen werden.

4.1.2 Bohrkernuntersuchung, Endoskopie, Widerstandsmessung

Bohrkernuntersuchung

Mit einem Hohlbohrer (auch „Zapfenfräser“) mit einem Außendurchmesser zwischen 20 und 30 mm, werden Bohrkern aus dem Probekörper für Untersuchungen gewonnen. An gezogenen Bohrkernen können sowohl die Zerstörung durch Pilze oder Insekten, die Feuchte, die Rohdichte, die Jahrringbreite, die Verteilung von Kern- und Splintholz und die Holzart bestimmt werden, als auch chemische Analysen durchgeführt werden [SCHWAB, 1982, WENZEL, 1999].

Endoskopie

Es ist möglich, mit der Endoskopie durch kleine Löcher im Bauteil Hohlräume wie Fehlböden zu untersuchen [RUSKE, 1982]. Dafür sind nur kleine Bohrungen notwendig, beispielsweise hat die kleinste Videoskopsonde des Herstellers *EverestVIT* einen Durchmesser von 3,9 mm. Weitere Hersteller können [BAM, 2004] entnommen werden.

Für die Anwendung der Endoskopie ist ein sehr großes Fachwissen erforderlich, z. B. können Spinnweben leicht mit dem Myzel von Hausschwamm verwechselt werden und Ausflüglöcher von Insekten müssen nicht gefunden werden, d. h. vorhandene Fraßgänge werden nicht vermutet.

Widerstandsmessung zur Feuchtenmessung mit der Rammelektrode

Bei der Feuchtenmessung mit der Rammelektrode werden zwei Stahlnadeln in einen Probekörper gepresst und der elektrische Widerstand zwischen beiden Elektroden gemessen. Je nach Bauart und der gewünschten Genauigkeit kann am Gerät die Holztemperatur und die Holzart eingestellt werden. Mit speziellen, am Schaft isolierten Elektroden, kann die Holzfeuchte in verschiedenen Tiefen bis etwa 6 cm bestimmt werden und eine Unterscheidung von Oberflächenfeuchte und innerer Feuchte ist möglich [ERLER, 1993].

4.1.3 (Geo-) Elektrische Tomographiemessungen

In vielen Bereichen der Materialprüfung und der angewandten Geophysik wird die Elektrische Widerstandstomographie eingesetzt, um die materialspezifische Eigenschaft den spezifischen *elektrischen Widerstand* oder dessen Kehrwert, die *elektrische Leitfähigkeit* zu bestimmen. Das Verfahren wird auch an Bäumen eingesetzt, wo es eine zwei- bis dreidimensionale Darstellung des Bauminneren ermöglicht.

Das Prinzip der Elektrischen Widerstandstomographie besteht aus der Messung von elektrischen Potentialdifferenzen (Spannungen), welche von einem eingespeisten niederfrequenten Wechselstrom verursacht werden. Die Messung erfolgt nur an der Oberfläche des zu untersuchenden Körpers und anhand der dort gemessenen Spannungswerte kann auf die elektrische Leitfähigkeitsverteilung im Innern des Körpers geschlossen werden. Somit handelt es sich um ein typisches inverses Problem, bei dem die Leitfähigkeitsverteilung im Inneren des Körpers aus den Oberflächendaten rekonstruiert werden [DUBBEL, 1999]. Umfangreiche Untersuchungen wurden auch von [WEIHS, 2001] im Rahmen eines Forschungsprojektes durchgeführt.

Nach [HAGREY, 2004] ist die Ortung der Wurzelzone von Bäumen mit Geoelektrik und Radar möglich. Untersuchungen an Bäumen ergaben, dass der trockene Kern hohe Widerstände und der äußere feuchte Bereich geringe Widerstände verursacht.

Untersuchungen zur Frische von Pappelholzern als Rohmaterial für die Papierindustrie kann [TIITTA, 2002] entnommen werden.

An der BAM wurden Untersuchungen von Frau T. MARTIN mit Spektral Induzierter Polarisation (SIP) durchgeführt [KRUSCHWITZ, 2005].

Bei dem SIP- Verfahren wird die Frequenzabhängigkeit des spezifischen komplexen, elektrischen Widerstandes untersucht. Über zwei Elektroden wird eine Wechselspannung in den Versuchskörper eingespeist und über zwei weitere Elektroden (4-Punkt-Anordnung) die Spannungsdifferenz gemessen. Als Frequenzbereich sind 1 mHz bis 1 kHz üblich.

Die materialspezifischen, elektrischen Parameter werden über die Amplitude und die Phasenverschiebung zwischen dem Stromsignal und der gemessenen Spannung bestimmt.

Das Verfahren wurde ursprünglich für Untersuchungen im Erdboden konzipiert, wird an der BAM zu Messungen an Bäumen angewendet [KRUSCHWITZ, 2005]. Im Rahmen der Arbeit wird das Verfahren in Kapitel A.5.3 in Verbindung mit Röntgenmessungen und Schalltomographie an einem Obstbaum mit Kernfäule angewendet.

4.1.4 Bohrwiderstandsmessungen

Die Bohrwiderstandsmethode ist ein sehr weit verbreitetes zerstörungsarmes Prüfverfahren für Holz. Sie wird zur Ortung von verdeckten Fäulnis- und Hohlstellen verwendet und erzielt am Messpunkt sehr detaillierte Informationen über den Bohrwiderstand und damit über die relative Festigkeit des Holzes.

Prinzip der Bohrwiderstandsmethode:

Ein dünner Bohrer (Abbildung 13) wird mit einer hohen Umdrehungszahl und konstanter Vorschubgeschwindigkeit in das Holz eingebohrt. Dabei wird die Leistung gemessen und aufgezeichnet, die der Motor benötigt, um eine konstante Vorschubgeschwindigkeit zu erzielen. Aus der benötigten Energie kann nach Untersuchungen von Görlacher und Hättrich [GÖRLACHER, 1990 (1)] auf die relative Härte des Holzes geschlossen werden, die wiederum mit den wichtigsten Festigkeitsparametern zusammenhängt. Hartes Holz verursacht einen größeren Bohrwiderstand als weiches Holz, was eindrucksvoll bei der Unterscheidung von härterem Spätholz und weicherem Frühholz zu sehen ist (Abbildung 14). So kann anhand des Bohrwiderstandsdiagramms eine Aussage über den Zustand des

geprüften Holzes an der durchbohrten Stelle gemacht werden und durch Fäulnis oder Insektenbefall geschädigtes Holz lokalisiert werden [GÖRLACHER, 1990 (1), THÜMLER, 1991, SCHWARZE, 1994].

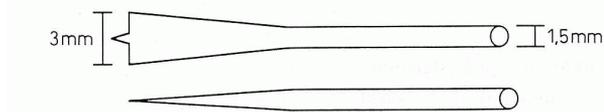


Abbildung 13:
Bohrwiderstandsnadel mit
abgeflachter Spitze
[ECKSTEIN, 1994]

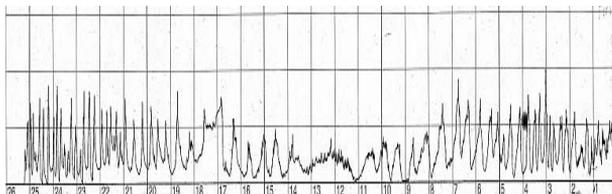


Abbildung 14: oben: Eigene Messung an einem historischen Balken in der Werkstatt des Bauarchivs des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege;
unten: Bohrwiderstandsdiagramm zur oben dargestellten Bohrung mit Früh- Spätholzwechsel und geringerem Widerstand in Kernnähe

Abbildung 15: Eigene Praxismessung: Balken der Bibliothek des Klosters Dillingen

Abbildung 14 zeigt das später verwendete Gerät der Firma IML [IML, 2004] im Einsatz. Als Antrieb für die bis zu 40 cm lange Bohrnadel (Abbildung 13) wird hier eine Akku-Bohrmaschine verwendet, wobei es auch andere Geräte der Hersteller IML und Frank Rinn [RINN, 2004] mit innenliegenden Motoren gibt. Bei der Bohrung wird die, für die konstante Vorschubgeschwindigkeit der Nadel im Holz benötigte Energie gemessen und als Bohrwiderstand (y-Achse) in einem Maßstab von 1/10 bis 1/100 mm über den Bohrweg (x-Achse) aufgezeichnet. Je nach Geräteausführung wird das Bohrwiderstandsdiagramm am Gerät mit einer Nadel auf Wachspapier maßstabsgetreu aufgezeichnet oder im Gerät digital gespeichert und später über einen Laptop ausgegeben und weiter verarbeitet.

Eigene Messungen (Abbildung 14, Abbildung 15) wurden im Rahmen einer Weiterbildungsmaßnahme beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege durchgeführt (siehe Kapitel A.4.1, [HASENSTAB, 2005 (1)]).

Anwendungsmöglichkeiten der Bohrwiderstandsmethode:

- Unterschied zwischen weicherem Früh- und härterem Spätholz
- Lokalisieren von Schwindrissen
- Detektierung von Hausbockbefall (Fraßgänge 5 mm Durchmesser)
- Detektierung von Fäulnis, die sich durch einen allmählichen Abfall des Bohrwiderstandes auszeichnet wobei die Jahrringabfolge noch erkennbar sein kann. Erst bei völliger Zerstörung des Holzes sinkt der Bohrwiderstand stark.
- Ermittlung der Geometrie und Abmessungen von Anschlüssen im Inneren einer Konstruktion
- Bestimmung der Bauteilgeometrie bei verbauten und nur einseitig zugänglichen Bauteilen für statische Bemessungen und zur Kalibrierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren wie Ultraschall-Echo oder Röntgen

Fazit:

Die Bohrwiderstandsmethode ist ein sehr zuverlässiges und einfach handhabbares Verfahren, mit dem an ausgewählten Punkten eine detaillierte Information über den Zustand des Holzes erlangt wird. So kann mit einer kleinen Bohrung von nur 3 mm Durchmesser die Bauteilabmessung oder die genaue Lage (Tiefe) einer Schädigung bestimmt werden. Dennoch ist für die Auswertung viel Erfahrung erforderlich und bei der Verallgemeinerung der Ergebnisse sollte immer berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse von Punktmessungen stammen.

In der vorliegenden Arbeit wird dieses Verfahren verwendet, um Bereiche, bei denen mit dem zerstörungsfreien Verfahren Ultraschallecho kein Rückwandecho zu empfangen ist, genauer zu untersuchen. Auch ist es möglich, das empfangene Rückwandecho bei Ultraschallechomessungen einer Tiefe oder einen, im Röntgenbild sichtbaren, Defekt einer Tiefenlage zuzuordnen.

4.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren haben gegenüber den zerstörungssamen Verfahren den entscheidenden Vorteil, dass bei den Untersuchungen keine Schädigungen am Probekörper verursacht werden. So können, z. B. an hoch beanspruchten Bauteilen oder zur Qualitätssicherung, beliebig viele Messungen durchgeführt werden. Die notwendigen zerstörungssamen Kalibrierungsmessungen können an statisch kaum belasteten Konstruktionsteilen oder an optisch nicht relevanten Stellen durchgeführt werden.

4.2.1 Optische Untersuchungsverfahren

Visuelle Einschätzung

Die visuelle Einschätzung stellt die wichtigste, und immer vor allen weiterführenden Untersuchungen durchgeführte, Methode zur Einschätzung der Bausubstanz dar, kann aber ohne vorhandenes Fachwissen leicht zu Fehlinterpretationen führen. Was hierbei zu beachten ist kann [DZIERZON, 1990, CRAMER, 1993, MÖNK, 1999] entnommen werden.

Photogrammetrische Deformationsmessung

Mit den photogrammetrisch durchgeführten Messungen können Deformationen an Gebäuden untersucht werden. Durch spätere Wiederholungen der Messungen ist ein Verfolgen der Verformungen, dem „Arbeiten“ des Gebäudes, möglich [FOKUS, 2004].

Oberflächeninspektion durch multisensorischen Ansatz

Mit optischen Sensoren können Oberflächenschäden wie Bläue, Harzgallen, Äste, Risse, Rinde und Insektenfraß sowie Höhenunterschiede [NESTLER, 2000] erkannt werden. Eine Schnittoptimierung ist so mit optoelektronischer Holzsortierung nach [JOANNEUM, 2005] möglich. Auch Beanspruchungen von eingebauten Holzbauteilen können nach [FRANKE, 2005] mit 2D-Photogrammetrie dargestellt werden. Über die Absorption von Licht durch feuchte Medien kann maschinell die Holzfeuchte mit dem Gerät IR3000WBPi [GRECON, 2004] von Holzspänen bei der Holzfaserplattenherstellung bestimmt werden.

Thermografie

Unter Thermographie wird eine bildgebende, berührungslose Temperaturmessung verstanden, bei der die Wärmestrahlung der Oberfläche gemessen wird [BAM, 2005]. Durch eine inhomogene Wärmeverteilung auf der Oberfläche kann auf die Feuchtenverteilung und die Wärmeleitfähigkeit im oberflächennahen Bereich geschlossen werden.

So eignet sich die Thermografie sehr gut zur Ortung der Lage von verputzten Holzbauteilen in Fachwerkkonstruktionen, was von [GERNER, 1980] in einigen Kleinstädten dokumentiert wurde. Auch Abbildung 16 wurde mit dem Prinzip der passiven Thermografie, d. h. es wird die Wärmestrahlung der Umgebung ohne aktives Erwärmen, aufgenommen.

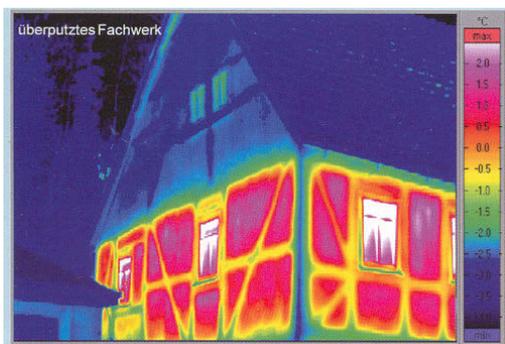


Abbildung 16: Detektion des Fachwerks unter Putz [INFRATEC, 2000]

Bedingt durch das Prinzip der Oberflächentemperaturbestimmung ist es mit der Thermografie schwierig, innere Schäden zu detektieren. Dennoch ist es bei Beton mit der

aktiven Thermografie, d. h. mit aktivem Erwärmen und Untersuchen des Abkühlverhaltens, möglich bis zu einer Tiefe von 8 cm Schadstellen zu detektieren [ARNDT, 2004]. Bei Holz und Holzwerkstoffen werden oberflächennahe Defekte [WU AND BUSSE, 1996] und Fehlverklebungen [BERGLIND, 2000, BERGLIND, 2003] geortet. Auch zur Untersuchung der Verläufe von Schäden [LOUNG, 2004], Fäulnis und Feuchte [TANAKA, 2000, WYCHUYSE, 2002] und innerer Schäden, wie Fäule oder Hohlstellen in Bäumen [CATENA, 2002], ist die Thermografie geeignet.

Nach [KOTHE, 1987, NIEMZ, 1993] ist es möglich, innere Fehlstellen mit Thermografie zu detektieren, indem die Inhomogenitäten im Wärmestrom ausgewertet werden, die durch Fehlstellen wie Äste oder Risse verursacht werden.

4.2.2 Mechanische Untersuchungsverfahren

Belastungsversuch

Durch eine definierte Belastung wird beim Belastungsversuch eine Verformung am Bauteil hervorgerufen, woraus auf den Elastizitätsmodul des Bauteils geschlossen werden kann. Vor Ort wird meist die Biegebeanspruchung angewendet, da eine relativ geringe Belastung eine einfach messbare Verformung auslöst.

Durchbiegungsmessung mit einer Messvorrichtung der TH Karlsruhe werden in [WENZEL, 1999] beschrieben. Ganze Brücken und große Bauwerke können mit mobilen Belastungsaufbauten wie z. B. dem BEFA [GUTERMANN, 2003] untersucht werden.

Schwingungsanalyse

Bei der Schwingungsanalyse wird das Bauteil an mehreren Punkten mit Impulsen angeregt. Gemessen werden sowohl die Anregungsimpulse als auch die Schwingungen in Holz. Untersuchungen von [GIER, 2001] an Fichtenbrettern ergaben, dass bei einem hohen Astanteil die Torsionsschwingungen abnehmen und die Biegeschwingungen zunehmen. Nach [BRANCHERIAU, 2002] ist eine Holzsortierung durch Auswertung der Schwingung möglich.

Schallemissionsanalyse

Bei der Schallemissionsanalyse werden Schallsignale analysiert, die durch eine mechanische oder thermische Belastung unterhalb der Versagensgrenze an festen Körpern als akustische Emissionen (Bursts) ausgesandt werden [BAM, 2005]. Besonders zur Bestimmung der Resttragfähigkeit wird das Verfahren im Stahl- und Betonbau verbreitet angewendet.

Nach [NIEMZ, 1994] ist es mit der Schallemission prinzipiell möglich, die Holzfeuchte bei Schnittholztrocknung online zu überwachen. Auch zur Bestimmung von Dichteprofilen von Holzwerkstoffen soll das Verfahren nach [LEMASTER, 1985] geeignet sein. Fäulnis von Holz kann nach intensiven Untersuchungen von [NOGUCHI, 1992] und [BUCUR, 1995] mit der Schallemissionsanalyse gut an einer deutlichen Zunahme der Anzahl der Schallemissionen erkannt werden. Auch das Versagensverhalten von BSH-Trägern kann mit Schallemission sehr gut untersucht werden [DILL-LANGER, 2002]. Weitere Untersuchungen wurden von [NIEMZ, 1992, BECKER, 1993, HOBOHM, 1996] durchgeführt.

4.2.3 Elektromagnetische Verfahren

Radar/Mikrowelle

Mit Mikrowelle und Radar können die dielektrischen Eigenschaften von Holz untersucht werden. Dabei ist eine Untersuchung in Transmission und in Echo-Technik möglich, wobei elektromagnetische Wellen der Frequenz zwischen 300 MHz und 300 GHz angewendet werden. Die Amplitude, Phase und die Polarisation werden ausgewertet. Ein sehr großer Vorteil dieser Verfahren ist, dass mit den kleinen, hoch auflösenden Antennen Messungen in Echtzeit durchgeführt werden können. Für beide Verfahren sind die Anisotropie, die Heterogenität und die natürlichen Defekte im Holz problematisch.

Mit **Mikrowelle** ist es möglich, die Materialdichte, den Feuchtegehalt und den Faserwinkel zu untersuchen [KHARADLY, 1985], sowie Inhomogenitäten und Defekte zu Orten. Neben der Holzfeuchte kann auch die Salzverteilung in Holz untersucht werden [LESCHNIK, 2004].

Das **Radarverfahren** ist beispielsweise zum Detektieren von Fäulnis in Bäumen [MILLER, 1990] oder Fäulnis- und Insektenschäden an Holzbrücken aus Baumstämmen [MULLER, 2003] geeignet. Eine einfache baupraktische Anwendung des Bodenradars in der Bauwerksdiagnostik ist die Ortung der Balkenlage in Bauwerken, denn für das Verständnis des Tragverhaltens des Bauwerks ist die Lage der Balken von großer Bedeutung. Zudem ist die genaue Lage der Balken für die Optimierung weiterer Untersuchungen mit Bohrwiderstand oder Durchstrahlung sehr vorteilhaft.

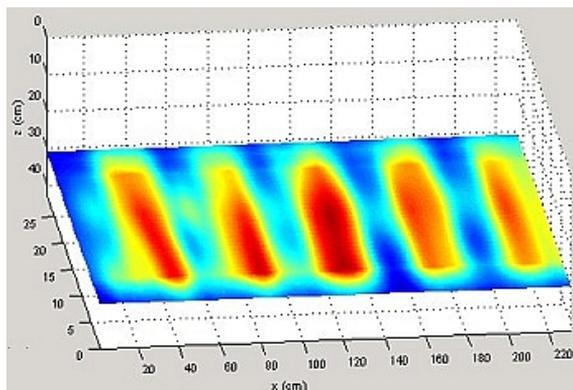


Abbildung 17: Ortung der Balkenlage mit Radar [ONSITEFORMASONRY, 2005]

In Abbildung 17 ist eine Balkenlage eines Hauses, das im Rahmen eines in der BAM koordinierten EU-Projektes untersucht wurde, gut zu erkennen [ONSITEFORMASONRY, 2005]. Laut [MAYERHOFER, 2004] konnte auch die Balkenlage bei Messungen in der Wartburg mit der 1,5 GHz Radarantenne klar bestimmt werden. Untersuchungen durch Hasenstab, Wöstmann, Kind an der BAM bestätigten dies.

Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT)

Die in der Medizin weit verbreitete Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) oder auch Kernspintomographie, ist ein bildgebendes Verfahren, bei dem mit Hilfe starker Magnetfelder und Radiowellen Schnittbilder vom untersuchten Körper erzeugt werden. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass keine Röntgenstrahlen angewendet werden und die Möglichkeit besteht,

den Körper in unterschiedlichen Schnittebenen und mit sehr hohem Bildkontrast darzustellen.

An Holz wurde die MRT von [WANG, 1990, GUZENDA, 2001, BUCUR, 2002] angewendet und ergab, dass Kernholz, Druckholz, Jahrringe, Äste, Rinde und das für den Feuchtetransport wichtige freie und gebundene Wasser unterschieden werden können. Nach Untersuchungen von [MÜLLER, 2001] ist es möglich, mit der MRT frühzeitig Fäule über einen erhöhten Wassergehalt zu erkennen. Weitere Untersuchungen zur Fäuleerkennung werden an der Universität Minnesota, USA, durchgeführt.

4.2.4 Laserinduzierte Breakdown Spectroscopy (LIBS)

Mit der Laserinduzierten Breakdown Spectroscopy (LIBS) kann die Elementverteilung an der Oberfläche von Baustoffproben gemessen werden.

Bei der Messung wird mit einem energiereichen Laserpuls (Nd:YAG-Laser) eine kleine Menge des Oberflächenmaterials verdampft und dabei ein Plasma erzeugt. Die Fluoreszenzstrahlung des Plasmas wird spektroskopisch analysiert und liefert Angaben über den Elementgehalt. Mit LIBS können alle Elemente von Wasserstoff bis Uran detektiert werden, wobei Moleküle nicht erfasst werden können. In einer Messung können sowohl Aussagen über Hauptbestandteile der Probe (z. B. Ca, Mg, Si, Al, Fe, etc.), als auch über Spurenelemente gewonnen werden. Die Nachweisgrenze für die Elemente liegt im ppm-Bereich. Detailliertere Angaben können [WILSCH, 2004] entnommen werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde LIBS zu einer genaueren Analyse eines Bereichs in einem Bauteil, welcher bei Röntgenuntersuchungen auffällig war, angewendet (siehe Kapitel A.5.2).

4.2.5 Durchstrahlungsverfahren

Die Durchstrahlung von Holz wird in der Holzsortierung und zur Untersuchung von Kunstwerken, Bauteilen und Bäumen praktisch angewendet. An dieser Stelle wird insbesondere auf die Röntgenstrahlung eingegangen, da diese auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Kapitel A.2.4 in Form von Untersuchungen an Bäumen und Bauteilen angewendet wird.

Röntgenverfahren in der Holzindustrie und Holzsortierung

In der Holzindustrie wird die Röntgenstrahlung Tag täglich zur maschinellen Sortierung und für die Qualitätssicherung bei der Faserplattenherstellung angewandt. Beispielsweise wird bei den Geräten *BW4* und *BWQ* des Herstellers *GreCon* [GRECON, 2004] das Flächengewicht von Spanplatten beim Herstellungsprozess online überprüft, um eine gleichbleibende Materialqualität zu gewährleisten. Die theoretischen Grundlagen hierzu können [ADJANOHO, 1999] entnommen werden.

Um Baumstämme mit Rinde auf innere Schäden und auf Bereiche im Holz mit geringer Qualität hin zu untersuchen [HAUFFE, 2001], und um die sehr teuren Geräte in Sägewerken vor Schäden durch Steine und Metallsplitters zu bewahren werden oft die Stämme vor der Verarbeitung durchstrahlt. In der maschinellen Sortierung von Brettern und Balken werden Dichteunterschiede wie beispielsweise Äste automatisch detektiert und markiert. Die

gekennzeichneten Bereiche werden dann maschinell erfasst und entfernt und ermöglichen Balken und Brettschichtholzbinde hoher Holzgüte und ohne Schäden. Weiter optimiert wurde die Ausbeute an gesundem Holz mit der Computer-Tomographie. Angewendet wird das Gerät WoodEye CrossCut der Firma Innovativ Vision [INNOVATIVE-VISION, 2004] und ein CT für Bauteile bis 1 m [LISTER, 2004], mit denen neben den Ästen auch Fäule, Verfärbungen, Harzgallen und Holzfehler detektiert werden können.

Röntgenuntersuchungen an Kunstwerken

Röntgenuntersuchungen an Kunstwerken werden meist im Labor durchgeführt und umfassen die Untersuchung des Aufbaus, möglicher Untermalungen und Schädigung des Kunstobjektes sowie des zugehörigen Holzrahmens [NICOLAUS, 2003]. Beispielsweise wurden in Bildern von August Macke in der Neuen Pinakothek in München Untermalungen gefunden (Abbildung 18, Abbildung 19) [HEIDGER, 2004] oder bei der Untersuchungen der Teje des Ägyptischen Museums Berlin verdeckter Schmuck entdeckt [ILLERHAUS, 1995].



Abbildung 18: Der Tiger (1912) Öl auf Leinwand, 111 x 111,5 cm Städtische Galerie im Lenbachhaus, München Inv. Nr. G 13 320 [HEIDGER, 2004]



Abbildung 19: Unter der Oberfläche des heute sichtbaren Bildes ist ein weiblicher Akt zu erkennen. Die Frau sitzt auf einem Sofa und hat ihre Arme hinter dem Kopf verschränkt. [HEIDGER, 2004]

Durchstrahlungsuntersuchungen an Bauteilen

Aufgrund der großen Absorption an Bauteilen aus Beton und Stein sind für die Durchstrahlung hohe Energien erforderlich, sodass die harten Strahlen einer Kobaltquelle (Co_{60}) zum Einsatz [WEISE, 2004] kommen. An Holz ist aufgrund der geringeren Dichte eine Anwendung von Röntgenstrahlung möglich. Messungen in Bauwerken zur Zustandsanalyse wurden beispielsweise von [HEIDGER, 2003] an der Badenburg des Schlosses Nymphenburg in München oder dem Neuen Schloss in Bayreuth durchgeführt und ergaben, dass die Tragfähigkeit der Balken ohne Reparaturmaßnahmen ausreichend ist. Die befürchtete Zerstörung der Deckenbalken durch Fäulnis war nicht gegeben und eine sehr kostspielige und zeitaufwendige Entfernung des Schmuckparketts war dank der Röntgenuntersuchungen nicht erforderlich [PIENING, 2004].

Auch das Verhalten von nicht sichtbaren Verbindungsmitteln in Holzkonstruktionen kann mit Durchstrahlung untersucht werden [SCHEER, 1980]. Untersuchungen an allseitig zugänglichen Bauteilen und Bäumen werden folgend beschrieben.

Durchstrahlungsuntersuchungen an Bäumen und Masten

Durch die allseitige Zugänglichkeit ist ein Messen rund um das Bauteil möglich, was neben der einfachen Durchstrahlung auch eine Anwendung der Computer-Tomographie (CT) ermöglicht. Mit dieser Methode sind die vollständigsten und detailreichsten Ergebnisse erzielbar, die aber sehr zeit- und geräteaufwändig sind.

Auch hier sind die inneren Schäden von Holz die am häufigsten bearbeitete Problemstellung. Man unterscheidet Labormessungen und Messungen vor Ort [SAUERWEIN, 2002]. CT im Labor ist ein gebräuchliches Verfahren zur Untersuchung von Bauteilen. Aus der Vielzahl der Anwendungen an Hölzern folgend einige wenige Beispiele. Messungen an der Charite in Berlin mit der medizinischen Anlage SOMATOM CR von Siemens stellten einen sehr guten Zusammenhang zwischen Schädigungen wie Fäulnis und dem Absorptionskoeffizienten her [KLETT, 1991]. Die bestechenden Details in der Tiefe des Objektes können an einer Messung an einer einzelnen Baumscheibe mit einem Linearbeschleuniger (12 MeV Linac, Raytec) der BAM gezeigt werden (Abbildung 20), bei der die Feuchtigkeitsgrenzen als Kontrastunterschied gut erkennbar sind.

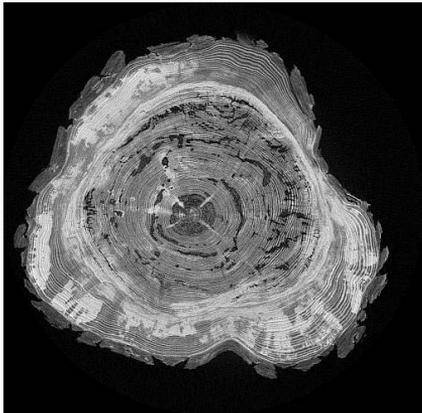


Abbildung 20: CT von einer Baumscheibe mit Linearbeschleuniger (12 MeV Linac, Raytec) an der BAM I.4. Die Feuchtigkeitsbereiche sind aufgrund des Kontrastunterschiedes gut erkennbar.

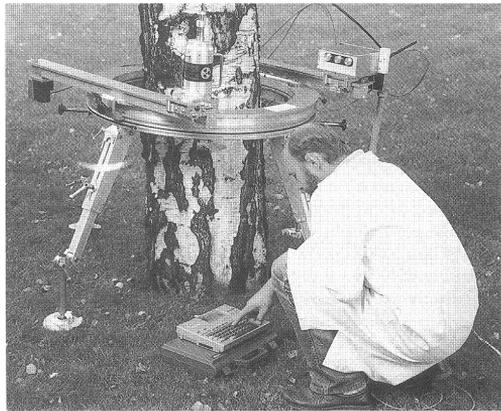


Abbildung 21: mobiles Computer-Tomographiegerät MCT-3 [HABERMEHL, 1992]

Für Messungen vor Ort steht ein portabler Tomograph zur Verfügung, mit dem der Zustand von Masten und Bäumen untersucht werden kann [HABERMEHL, 1992, HABERMEHL, 1993]. Das in Abbildung 21 gezeigte Gerät MCT-3 verwendet als Strahlenquelle Cäsium 137 und es ist möglich anhand der errechneten Dichteverteilungen Äste, Fäulnisbereiche, Innenwurzeln und Frostrisse genau zu erkennen. Der maximale mögliche Durchmesser eines Baumes beträgt je nach Apparatur 80 cm oder 1 m.

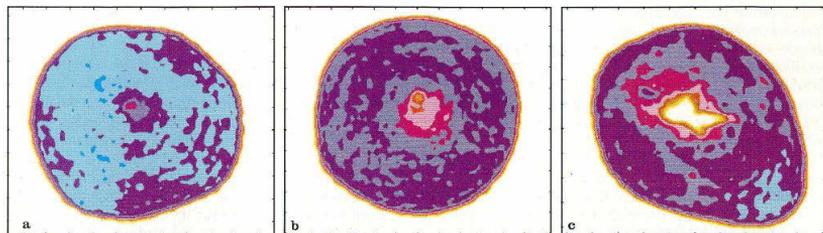


Abbildung 22: CT einer Kernfäule bei Linden, a) gesund, b) krank, c) Hohlraum [HABERMEHL, 1993]

Untersuchung der Holzanatomie mit CT

Auch in der Holzforschung wird die Computer-Tomographie angewendet, um Detailuntersuchungen z. B. die Feuchteverteilung in Holz an Ästen zu untersuchen [DANVIND, 2004], oder die genauen Dichten bei Jahrringfolgen zu bestimmen [CESAREO, 2000].

Neutronenradiographie an Holz

Mit der Neutronenradiographie können innere Defekte und die Feuchteverteilung im Holz untersucht werden. Dabei wird das Holz von Neutronen durchstrahlt, die im Gegensatz zur Röntgen- und Gammastrahlung sehr empfindlich gegenüber Wasser reagieren. Versuche von [LEHMANN, 2001] an Buche, Kiefer, Kastanie und Spanplatte zeigen, dass sowohl das im Holz gebundene Wasser als auch Feuchteveränderungen dargestellt werden können. Versuche von [OSTERLOH, 2005] an der BAM 2005 bestätigten dies.

4.2.6 Ultraschall

Ultraschall-Verfahren finden seit einigen Jahrzehnten Anwendung in der Materialuntersuchung von Holz. Im nun folgenden Kapitel wird ein Überblick über den Stand der Technik der Ultraschallprüfung von Holz gegeben.

Dabei wird, wie beschrieben, meist niederfrequenter Ultraschall verwendet. Teilweise ist dieser Schall so niederfrequent, dass er unterhalb der willkürlichen Grenze zum Hörschall (20 kHz) liegt. Der Vollständigkeit halber werden auch diese Impulsverfahren im folgenden Abschnitt berücksichtigt.

4.2.6.1 Messfrequenz, Prüfköpfe, Ankopplung, Dämpfung, Frequenzanalyse

Für die Untersuchung von Holz sind die Messfrequenz, die Prüfköpfe und die Ankopplung der selbigen von großer Bedeutung. Im Rahmen der eigenen Versuche werden diese wichtigen Komponenten in Kapitel 6 noch umfangreich diskutiert. Folgend einige in der Ultraschallprüfung an Holz üblichen Geräte und Einstellungen:

Messfrequenz

Wie bereits beschrieben ist Holz ein poröser Werkstoff, was bedeutet, dass für die Untersuchung wegen der frequenzabhängigen Dämpfung niederfrequente Prüfköpfe im

Bereich von 20 - 200 kHz erforderlich sind. Untersuchungen mit höheren Frequenzen bis zu 1 MHz sind wegen der hohen Dämpfung nur an Probekörpern mit Abmessungen von wenigen Zentimetern möglich.

Prüfköpfe

Als Prüfköpfe werden je nach Versuchsaufbau alle bekannten Prüfköpfe wie z. B. Zylinder-, Exponential- und Rollenprüfköpfe [SCHMOLDT, 1997] verwendet. Messungen ergaben, dass der Durchmesser (25 oder 50 mm) und die Form (zylindrisch oder konisch) der Prüfköpfe keinen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeiten haben [CHOFFEL, 1996].

Ankopplung

Die Ankopplung erfolgt über eingeschlagene Sensoren oder Nägel als Schallleiter oder über Koppelmittel. Als Koppelmittel werden alle bekannten Mittel verwendet, so beispielsweise Lackbenzin mit Alusterat [BARTLOMIEJ, 1977], Kunststoffkitt [BURMESTER, 1967], Wasser [HAN, 1996], Schmierfett [HAN, 1996], Vaseline [HALABE, 1995] oder Luft [LEMASTER, 1995] verwendet. Nach [HALABE, 1996] können durch die Anwendung eines Koppelmittels die Ergebnisse positiv beeinflusst werden, da der Signalverlust vermindert wird und somit die Messwerte durch eine bessere Ankopplung konstanter werden.

Dämpfung

Die Dämpfung der Ultraschallsignale im Probekörper wurde von [BURMESTER, 1967, KLINGSCH, 1989, SCHMOLDT, 1994 und LEMASTER, 1995] als Messgröße ausgewertet. Bei optimaler Ankopplung ist so eine Materialinhomogenität oder Schädigung gut zu erkennen, aber eine reproduzierbare Ankopplung ist meist sehr schwierig zu verwirklichen.

Frequenzanalyse

Versuche zur Fehlstellendetektierung in Holz mit Frequenzanalyse wurden u. a. von [HALABE, 1994, BIAGI, 1995, BOZHANG, 1996, HALABE, 1996, JONAS, 1997, HALABE, 1999] durchgeführt. Dabei konnte von [HALABE, 1994, SEELING, 2002] sehr gut gesundes und kernfaules Holz unterschieden werden.

4.2.6.2 Transmissionsmessungen

Bei der Transmission wird der Probekörper durchschallt, wobei hier aufgrund des Aufbaus von Holz in eine Durchschallung in Faserrichtung, d. h. axial und in eine Durchschallung senkrecht zur Faser, d. h. tangential oder radial, unterschieden werden muss. Die Schalllaufzeit wird meist mit den kommerziellen Geräten *Steinkamp BP5 (40 kHz)*, *BP7 (32 - 85 kHz)*, *Pundit* und *Silvatest (25 kHz)* durchgeführt, bei denen die gemessenen Laufzeiten digital ablesbar sind. In der Werkstoffprüfung sind auch andere Ultraschallprüfgeräte verbreitet, die zusätzlich die Darstellung der A-Bilder verwenden. Weiter sind beliebige Kombinationen von Laborapparaturen zur Untersuchung von Holz im Einsatz.

Transmissionsmessungen in Faserrichtung (axial)

Die Transmission in Faserrichtung setzt eine Ankopplung der Prüfköpfe an den Stirnflächen oder schräg eingebohrn an der Längsseite voraus. Diese Prüfkopfanzordnung wird an Brettern

und Balken häufig angewendet. Die Messungen ergaben, dass Hölzer mit einem höheren E-Modul eine hohe Schallgeschwindigkeit besitzen. Messungen hierfür wurden an Brettern und Balken beispielsweise von [SANDOZ, 2000, NIEMZ, 1995 (2), KUCER, 1998, KESSEL, 1989, GHERI, 1995, SANDOZ, 1996] durchgeführt. Untersuchungen an Stämmen [HAN, 1996], Bäumen [COMBE, 1997] und Telegraphenmasten [BHUAN, 1997, KHALID, 1999] bestätigten diesen Zusammenhang. Dennoch ergaben Untersuchungen auch, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Rohdichte [NIEMZ, 1995 (2), BUEMESTER, 1967] nicht möglich ist, d. h. dass aus einer gemessenen Schallgeschwindigkeit nicht eindeutig auf die Rohdichte geschlossen werden kann. Dies trifft auch für den Zusammenhang zwischen dem Schalldruck und der Biegefestigkeit zu [BFH, 1995]. Da die Korrelation zwischen der Schallgeschwindigkeit und der zulässigen Biegespannung einen Korrelationskoeffizienten von 0,7 und deutlich weniger aufweist, ist eine Sortierung des Holzes in Güteklassen alleinig über die Ultraschallgeschwindigkeit ungenau [DIEBOLD, 2000].

Mit dem Ultraschallgerät *Silvatest* können aus dem vorausgesetztem Zusammenhang sofort aus den Ultraschallgeschwindigkeiten die zulässigen Biegespannungen und Biege E-Module errechnet werden. Untersuchungen ergaben, dass diese Werte teilweise erheblich höher als die später zerstörend bestimmte realen Werte waren [HOBOHM, 1998].

An Stelle von einem Ultraschallkopf wird bei der **Impulsanregung** ein kleiner Hammer zur Anregung verwendet [WENZEL, 1999]. Das eingebrachte Signal ist niederfrequent und hat eine höhere Intensität als Signale, die mit einem Ultraschallkopf erzeugt werden können. So können Bauteile größerer Abmessung durchschallt werden [SCHOENE, 1993]. Etwas nachteilig ist, dass das Signal langwelliger ist als bei Ultraschall und das Anregungssignal in seiner Form nicht bekannt ist. Auch bei den Impulslaufzeitverfahren wird die Laufzeit gemessen und in den dynamischen E-Modul umgerechnet.

Neben Untersuchungen an Brettern [GÖRLACHER, 1991, DIVOS, 2002] wurden hierzu auch Messungen an Bäumen [BOOKER, 2002, WANG, 2002] durchgeführt.

Berichte von Messungen mit Ultraschall-Transmission in axialer Richtung vor Ort an Bauteilen variieren zwischen dem erfolgreichen Einsatz mit einer Güteaufwertung des Holzes [KUDRNOVSKI, 1992] und der Frage nach einer Detektierbarkeit von Innenfäule bei Hölzern. Dies ist besonders schwierig, da die Schallwelle in den gesunden, äußeren Bereich abgeleitet werden kann [TICHELMANN, 1993]. Laut [GLOS, 2002] ist der Anteil der Schallwellen, der sich durch die restlichen zusammenhängenden Fasern ausbreitet so hoch, dass nach dem „Zusammenstecken“ wieder eine hohe Schallgeschwindigkeit erreicht wird, was einen hohen E-Modul vortäuscht.

Da es sich bei den gemessenen Schalllaufzeiten einer axialen Durchschallung immer um einen Durchschnittswert über die Länge handelt, werden auch Versuche radial oder tangential zur Achse durchgeführt. Dazu mehr im folgenden Abschnitt.

Transmissionsmessungen senkrecht zur Faserrichtung (radial/tangential)

Der Schallweg ist bei einer Transmissionsmessung senkrecht zur Faser (Abbildung 25) sehr viel kürzer als bei einer Messung entlang der langen Bauteilachse. Da die Schalllaufzeit von allen Inhomogenitäten beeinflusst wird, bedeutet ein kürzerer Schallweg eine bessere

räumliche Zuordnung im Bauteil. Nachteilig ist, dass an Stelle von einer axialen Messung bei der gleichen Bauteilgröße mehrere radiale Messungen erforderlich sind.

Durch die kürzeren Schallwege und somit einer geringeren Dämpfung der **Ultraschallsignale** sind höhere Frequenzen von 80 kHz [GONCALVES, 2005] möglich und neben der Auswertung der Schalllaufzeit ist auch eine Auswertung der Schallintensität möglich. Mit Transmissionsmessungen senkrecht zur Faser ist die Ortung von Ästen sehr gut möglich, [BURMESTER, 1967] aber auch die Bestimmung der Einflüsse der Jahrringe [FEENEY, 1996] und deren Breite [HAUFFE, 2001]. Defekte wie Risse und eingebrachte Bohrungen [NIEMZ, 2002] oder Fäulnis [BARTLOMIEJ, 1977, KLINGSCH, 1989], und andere Schäden [SCHMOLDT, 1994, MACHADO, 2002] können so auch geortet werden. Das Frequenzspektrum des transmitierten Signals ändert sich bei Fäule stark und die Amplitude des Signals nimmt ab [KABIR, 2002]. Durch eine Verwendung von Rollenprüfköpfen mit 84 kHz ist eine schnelle Messungen möglich [ROSS, 1995, SCHMOLDT, 1997]. Ultraschallversuche an Bäumen zeigten, dass die Ortung von Kernfäule [BREEZE, 1971, COMBE, 1997, NIEMZ, 2001] und die Bestimmung der Steifigkeit [HUANG, 2000] möglich ist. Auch eine Überwachung des Trocknungsprozesses von Holzlaminate [BEALL, 1993 (1)] und Sperrholz [BEALL, 1993 (2)] ist mit Ultraschall-Transmission möglich und Defekte in Laminaten mit einer Dicke von 7 cm [BIERNACKI, 1993] und Keilzinkenverbindungen können geortet werden [ANTHONY, 1996].

Für Brettschichtholz stellen Delaminationen in den Fugen und Risse parallel zur Fugenrichtung ein großes Problem dar. Intensive Untersuchungen an der Material-Prüfanstalt (MPA) Stuttgart ergaben, dass mit Ultraschall in Transmission senkrecht zur Faser hier durch einen 44 cm hohen BSH- Träger es möglich ist, die Risslänge eindeutig bestimmen zu können [AICHER, 2002, Dill-Langer, 2002].

Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen der BAM und der MPA Stuttgart kam es zu einer Einladung zum Informationsaustausch mit einem Vortrag über die Forschung der BAM an Holz. Daran anschließend wurde der BSH-Träger für ZfP-Messungen an der BAM zur Verfügung gestellt, um die Grenzen der Möglichkeiten von Ultraschallecho zu testen. Ergebnisse hierzu können Kapitel 7.2 entnommen werden.

Untersuchungen zur Laufzeitbestimmung mit Durchschallung senkrecht zur Faser mit dem niederfrequenten Impulshammer [NIEMZ, 2002] werden meist für Anwendungen in der Tomographie verwendet. Denn bei einer einfachen Transmission wird immer nur eine integrale Aussage über die Verbindungsachse zwischen dem Sender und dem Empfänger erlangt. Die genaue Lage des Defektes im Körper ist nur mit der Überlagerung mehrerer Messungen möglich, dafür stehen tomographische Methoden zur Verfügung.

4.2.6.3 Tomographie

Um aus den Laufzeitinformationen einer Strecke die genaue Lage eines Defektes bestimmen zu können sind mehrere Messungen erforderlich. So wird beispielsweise die Position des Senders nicht verändert und das Signal wird an mehreren Messpunkten von einem oder mehreren Prüfköpfen empfangen. Die Genauigkeit der Ergebnisse kann mit der Anzahl der Messungen gesteigert werden. Durch eine Verwendung von mehreren Empfängern kann der Messaufwand zeitlich stark reduziert werden.

In der Literatur werden alle Ergebnisse aus diesen Messanordnungen als Tomogramme bezeichnet, wobei, streng genommen, das nur für Berechnungen mit einem bestimmten Algorithmus gilt [NOLET, 1987, BERRYMAN, 1990]. Da in den Veröffentlichungen keine genauen Angaben über diese Berechnung gemacht wird, werden folgend alle räumlich korrigierten überlagerten Ergebnisse als Tomogramme bezeichnet.

Mit **Ultraschall**tomographie war es möglich, Schäden in Telegraphenmasten zu orten [KHALID, 1999]. Dabei wurden sowohl Durchschallungen in radialer als auch in tangentialer Richtung durchgeführt. Ausgewertet und überlagert wurden dabei die Schallgeschwindigkeiten und die Schallintensitäten. Die Variante mit einem festen Sender und einem variablen Empfänger wird von [KANDA, 1998] für Messungen an Masten beschrieben. Gute Ergebnisse an Bäumen mit Ultraschall und anderen Verfahren sind in [NICOLOTTI et al, 2003, SOCCO, 2002] beschrieben.

Besonders **Impuls**anregung ist in der Tomographie an Bäumen sehr weit verbreitet. Die Anwendung des Gerätes *PICUS* wird in Kapitel A.5.3 anhand einer gemeinsamen Messung an der BAM mit einem Entwickler des Tomographen *PICUS*, Herrn Göcke, der Firma argus electronic beschrieben.

Gebräuchlich sind hier die Geräte *PICUS* [RUST, 2000, SCHWARZE, 2004, PICUS, 2005] und *Fakopp* [DIVOS, 2002], wobei es ein baulich dem *Picus* sehr ähnliches Gerät, das *Arbotom* [RINN, 2005] gibt. Durch niedrige Frequenzen und die hohe eingebrachte Energie ist es mit dem Impuls-Tomographen möglich, vor Ort Bäume mit Durchmesser von 2 m und mehr zu untersuchen, was mit Röntgentomographie beispielsweise nicht möglich ist.

4.2.6.4 Luftgekoppelter Ultraschall

Luftgekoppelter Ultraschall hat den sehr großen Vorteil, dass keine Koppelmittel und kein direkter Kontakt benötigt wird. Dies macht Messungen an stark saugenden oder wasserempfindlichen Materialien wie trockengepressten Grünkeramiken, Metallschäumen und besonders an Holzfaserverplatten ohne Schädigungen durch Koppelmittel erst möglich [HILLGER, 2004]. Durch die Ankopplung über Luft kommt es wegen der Impedanzunterschiede zwischen dem Probekörper und Luft zu sehr hohen Schallverlusten, was besondere Prüfköpfe erfordert. Bei den Messungen kann vom empfangenen Signal die Laufzeit, die Intensität und die Frequenz ausgewertet werden.

Die Ergebnisse der Messungen werden meist als C-Bilder dargestellt und stellen die Intensität oder die Geschwindigkeit vom jeweiligen Messpunkt dar. Unterschiedliche Schallköpfe können Frequenzen zwischen 50 kHz und 2 MHz erzeugen.

Eine Anwendung der Luftultraschallprüfung ist die Ortung von Minderdicken von Hölzern (D = 13 mm) [SCHINDEL, 1995] und die Überprüfung der Dichte bei OSB-Platten (D = 13 mm) [VUN, 2004].

Messungen an einer 10 mm dicken Scheibe eines Brettschichtholzes ergaben auch, dass die Signale nach einer Wässerung des Probekörpers in der Intensität sehr stark abnehmen [STOESSEL, 2002], dennoch ist die Jahrringstruktur gut zu erkennen.

Der innere Verbund in Pressspanplatten mit Dicken bis 33 mm und MDF-Platten mit Dicken bis 25 mm kann mit Luftultraschall überwacht werden [KRUSE, 1996]. Industriell wird dies von [GRECON, 2004] mit dem Gerät *UPU3000* durchgeführt.

Untersuchungen an 5 - 7 mm dicken Bauteilen ergaben, dass bei Luftultraschall ein Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Dichte besteht und Äste in den Hölzern detektiert werden können [REVEL, 2004]. An 30 mm dicken Brettchen konnte [STÖSSEL, 2004] im Rahmen seiner Dissertation, sowohl Äste als auch Bohrungen zweifelsfrei orten.

Die bisherigen Veröffentlichungen zum Thema Luftultraschall an Holz erwecken den Eindruck, dass Durchschallung nur an Probekörpern mit Dicken von wenigen Zentimetern möglich ist. Messungen von [HILLGER, 2004] ergaben, dass Kiesnester in einem 20 cm dicken Betonkörper eindeutig zu Orten sind. Bei Messungen an der BAM ist es sogar möglich, Probekörper mit Dicken von 50 cm und mehr zu durchschallen, d. h. es stehen sehr leistungsstarke Prüfköpfe zur Verfügung. Im Rahmen dieser Messung wurden auch Holzkörper mit bis zu 12 cm Dicke durchschallt. Die Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 6.7 vorgestellt.

4.2.6.5 Messung von einer Bauteilseite

Bei Messungen mit einer Ankopplung beider Prüfköpfe auf einer Bauteilseite wird meist in Transmission vergleichend die Schallintensität gemessen. [SPECKHARDT, 2002] führte mit dieser Prüfkopfanzordnung Messungen an gefassten Bilderrahmen (d. h. Bilderrahmen mit Anstrich) durch, um innere Schäden wie Wurmbefall zu detektieren. Hierbei handelt es sich um keine Echomessungen, da laut Hersteller der angewendeten Prüfköpfe (Geotron Elektronik), diese ungedämpft sind und damit keine Echomessungen möglich sind (Kapitel 6.2.2). Auch bei der Pfahlprüfung, bei der mit einem Hammerschlag die Länge von Pfählen geprüft wird, kommt es zu einer Messung von einer Bauteilseite aus [ANTHONY, 1996, LADJAREVIC, 1996]. Das hier verwendete Ultraschallecho-Verfahren hingegen ist unbekannt.

4.2.6.6 Ultraschallecho

Trotz intensiver Nachforschungen standen zu Beginn der Arbeit (August 2002) außer der eigenen Ergebnisse im Rahmen der Diplomarbeit [HASENSTAB, 2002 (1), HASENSTAB, 2002 (2)] keine Veröffentlichungen zum Thema Ultraschallecho an Holz zur Verfügung. Die einzige, inzwischen bekannte, und nicht eigene Veröffentlichung, kommt von der TU Darmstadt, mit der auf dem Gebiet Ultraschallecho sehr eng zusammengearbeitet wird [LUTZ, 2004].

4.3 Übersicht über die Forschungsaktivitäten der Holzinstitute mit Ultraschall

Im Rahmen einer umfangreichen Recherche wurde zu Beginn der Arbeit versucht, neben der vorhandenen Literatur einen Überblick über die aktuelle Forschung mit ZfP an Holz zu erlangen. Zudem sollte geklärt werden, wo mit Ultraschall an Holz geforscht wird um keine Doppelforschung zu machen und vor allem, warum noch keine Veröffentlichungen zur Anwendung des Ultraschallecho-Verfahrens an Holz erschienen sind.

Aus den Gesprächen ging hervor, dass Echomessungen mit Ultraschall bisher als nicht möglich beachtet werden, obwohl dies schon mehrmals untersucht wurde. Als Grund hierfür

werden Probleme mit der Schwingungsdauer der Prüfköpfe und der hohen Dämpfung des Holzes angesehen.

Eine Aufzählung der Kontakte befindet sich in Anhang A.1

5 Grundlagen zur Ultraschalltechnik und deren Anwendung an Holz

In diesem Kapitel sind die grundlegenden Begriffe der Ultraschalltechnik als Basis für die Anwendung im Rahmen der vorliegenden Arbeit kurz erläutert. Weiter werden die Aspekte der Schallausbreitung in Holz unter Berücksichtigung der Anisotropie beschrieben und Modelle für das Verhalten der Longitudinal- und Transversalwellen in Holz vorgestellt. Außerdem werden die Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit und die unterschiedlichen Schallübergänge an Grenzflächen behandelt.

5.1 Ultraschalltechnik kurz erläutert

Als Hörschall bezeichnet man den hörbaren Schall, der vom niederfrequenten ($f \leq 16 \text{ Hz}$) Infraschall und dem höherfrequenten Ultraschall ($f \geq 20000 \text{ Hz}$) begrenzt wird. Der Ultraschall wird wiederum in niederfrequenten Ultraschall ($f \leq 500 \text{ kHz}$) und hochfrequenten Ultraschall unterteilt. Weiterführende Literatur ist z. B. [DEUTSCH, 1997, KRAUTKRÄMER, 1986, MATTHIES, 1998 und DGZFP, 1999]. In dem folgenden Kapitel wird besonders der niederfrequente Ultraschall behandelt, der zur Prüfung der porösen Werkstoffe Beton und Holz verwendet wird. Weiterführendes zur Untersuchung des Werkstoffs Beton kann einem Merkblatt der Deutschen Gesellschaft zur zerstörungsfreien Prüfung [DGZFP, 1999] und [SCHICKERT, 1999, KRAUSE, 2001] entnommen werden. Die Anwendung der Ultraschalltechnik am inhomogenen, anisotropen Werkstoff Holz ist noch in keinem Merkblatt enthalten und wird nachfolgend erläutert.

Für die Ultraschallprüfung stehen Prüfköpfe zur Verfügung, die in den zu untersuchenden Werkstoff Longitudinal- oder Transversalwellen aussenden.

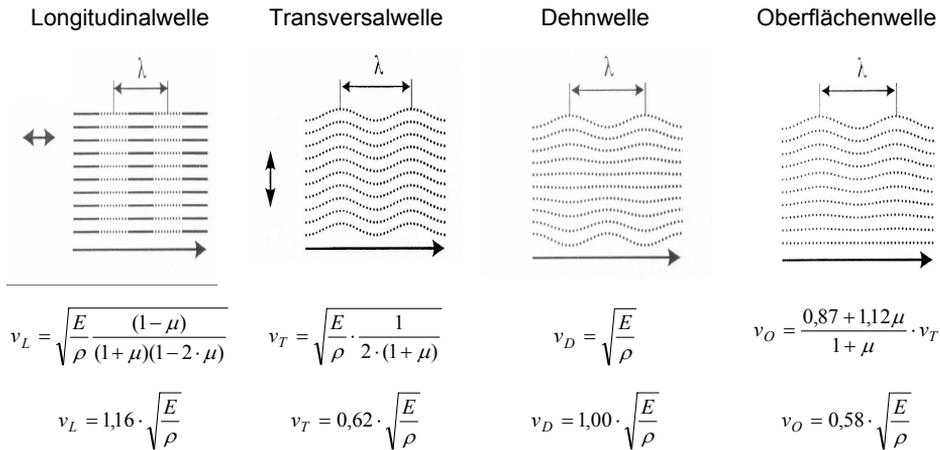
Schallwellen

Bei der **Longitudinalwelle** (Abbildung 23a) schwingen die Teilchen längs (lat. longitudinal) zur Schallausbreitungsrichtung. Diese Wellen werden wegen ihrer Eigenschaft auch als Dichte-, Druck-, Längs- oder Kompressionswelle (pressure wave, P-Welle) bezeichnet und breiten sich in allen Medien (Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen) aus.

Die Schwingungen der Teilchen quer (lat. transversal) zur Ausbreitungsrichtung wird als **Transversalwelle** (Abbildung 23b) bezeichnet, die nur in Festkörpern möglich ist, da sie über Querkraft d. h. über Schub oder Scherung übertragen werden (auch: Schub-, Scher- oder Querwellen).

Neben den monochromen (reinen) Longitudinal- und Transversalwellen, welche ideale, nicht begrenzte Medien benötigen, gibt es in der Praxis eine Reihe von Kombinationen dieser Wellen. Beispielsweise entstehen an den Grenzflächen die überwiegend transversalen **Oberflächen-** oder **Rayleighwellen** (Abbildung 23c), die eine Eindringtiefe von etwa einer Wellenlänge besitzen. Wenn die Bauteilabmessungen im Bereich der Wellenlänge liegen kommt es zusätzlich, je nach Geometrie, zu **Dehn- (Stab-) und Biege- (Platten-, Lamb-) Wellen** (Abbildung 23d). Um den störenden Einfluss der Geometrie zu reduzieren sollte

daher die Ausdehnung des Probekörpers in jede Raumrichtung die zweifache Wellenlänge nicht unterschreiten.



E Elastizitätsmodul
 μ Querdehnzahl
 ρ Dichte

Abbildung 23 a, b, c, d: Formen der verschiedenen Wellen in Festkörpern [DGZFP, 1999]; zum besseren Vergleich werden in der unteren Zeile die verschiedenen Geschwindigkeiten mit der Querdehnzahl $\mu = 0,3$ (als Durchschnittswert aus [SCHOLZ, 1999], bei Kiefernholz in Tangential- bzw. Radialrichtung bei Belastung in Faserrichtung $\mu = 0,30$ und $\mu = 0,31$) auf die häufig verwendete Dehnwelle bezogen.

Der Zusammenhang zwischen der charakteristischen (Phasen-) Ausbreitungsgeschwindigkeit c (in m/s) der Schallwelle, der Frequenz f (in 1/s) und der Wellenlänge λ ist in Gleichung 1 beschrieben.

$$c = \lambda \cdot f \qquad \text{Gleichung 1}$$

Aus der Abschätzung der Auflösung von $\approx \frac{\lambda}{2}$ kann nach Gleichung 1 die Ausdehnung bestimmt werden, ab der einzelne Defekte direkt detektiert werden können. Indirekt können Defekte beispielsweise durch eine Abschätzung der Rückwand schon eher geortet werden. Die Wellenlänge λ sollte deutlich größer als etwaige Inhomogenitäten wie Poren in Beton oder Holz sein, denn dann kann, bezogen auf die Wellenlänge, das Material als näherungsweise homogen angesehen werden. In Tabelle 2 wird der Zusammenhang zwischen der Prüffrequenz, der Wellenlänge und der Schallschwächung dargestellt.

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Frequenz, Wellenlänge und Schallschwächung

Ziel	Änderung am Messaufbau	Nachteil
bessere Auflösung durch kleinere Wellenlänge	höhere Frequenz	Zunahme der Schallschw. ergibt geringere Eindringtiefe der Welle
höhere Eindringtiefe der Welle durch Abnahme der Schallschwächung	niedrigere Frequenz	größere Wellenlänge ergibt geringere Auflösung

Schalldruck und Schallfeld

Eine rechnerische Abschätzung des Schallfeldes für die planaren Longitudinalwellenprüfköpfe G 0,2 GC (Abbildung 44) ergab, dass wegen des Nahfeldes bis in eine Tiefe von etwa 3 cm keine Schäden direkt detektiert werden können. Für die Punktkontaktprüfköpfe trifft dies nicht zu, da bei Punktanregung kein Nahfeld entsteht. Die genaue Berechnung und weitere Angaben zum Schalldruck und Schallfeld können dem Anhang A.2 entnommen werden.

Schallimpedanz

Die Schallimpedanz (auch Schallwiderstand oder Schallwellenwiderstand) Z beschreibt die materialtypischen elastischen Eigenschaften des Werkstoffs, wobei schallharte Werkstoffe eine hohe Schallimpedanz, schallschwache Werkstoffe eine geringe Schallimpedanz besitzen.

$$Z = \rho \cdot c$$

Gleichung 2: Schallimpedanz

Im Gegensatz zum elektrischen, ohmschen Widerstand macht die Schallimpedanz (Schallwellenwiderstand) keine Aussage über die Schallschwächung. Zum Beispiel sind sowohl der schallharte Stahl und die schallweiche Luft gute Schalleiter.

Für wenige Fälle wird auch die Schallintensität I benötigt, die in $\frac{W}{m^2}$ angegeben ist, die sich aus dem Schalldruck p und der Schallimpedanz Z ergibt, und somit einer Leistungsdichte entspricht. Bei gegebenem Prüfkopfdurchmesser ist sie dem Quadrat des Schalldrucks p proportional.

$$I = \frac{p^2}{2 \cdot Z} \text{ in } \frac{W}{m^2}$$

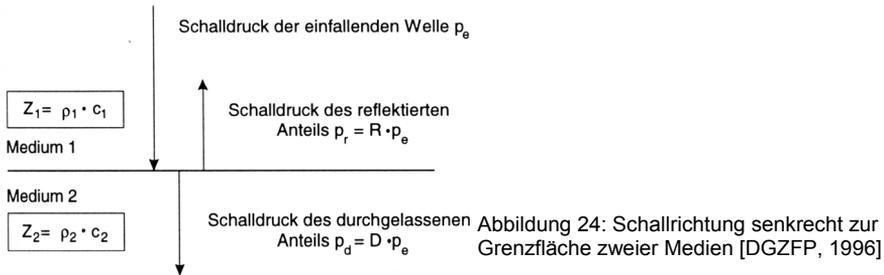
Gleichung 3: Schallintensität

Zur besseren Vergleichbarkeit werden der Schalldruck p und die Schallintensität I oft in direkten Verhältniswerten angegeben und in logarithmische Dezibel-Einheiten umgerechnet. Dabei entspricht z. B. das Verhältnis zwei zu eins einem Größenverhältnis von 6 dB.

Schallreflexion und Schalldurchgang an Grenzflächen

Grenzflächen sind Flächen zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Schallimpedanzen Z . Für Medien mit großen Volumina in Verhältnis zu den Wellenlängen wird das Verhalten der Schallwellen nur vom Einfallswinkel der Schallwelle und den Schallwellenwiderständen Z beeinflusst.

Eine senkrecht auf eine Grenzfläche auftreffende Welle (Abbildung 24) wird reflektiert, wenn der Schallwellenwiderstand des ersten Mediums größer als im zweiten Medium ist. Ist der Schallwellenwiderstand des zweiten Mediums null (Vakuum), kommt es zu einer Totalreflexion, was beim Übergang vom Festkörper zu Luft nahezu erfüllt ist.



Zwischen zwei aneinandergrenzenden Medien wird um so mehr Schall übertragen, je geringer die Unterschiede der beiden Schallwellenwiderstände Z sind.

Dies bedeutet, dass die Weiterleitung des Schalls mit der Zunahme der Unterschiede von Z abnimmt. Mit dem Reflexionsfaktor R wird angegeben, wie viel des eingefallenen Schalldrucks reflektiert wird. Der Durchlässigkeitsfaktor D gibt an, wie viel Schalldruck in den anderen Werkstoff übergekoppelt wird.

Für senkrechten Einfall (Abbildung 24) gilt:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Gleichung 4: Reflexionsfaktor } R$$

$$D = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} = 1 + R \quad \text{Gleichung 5: Durchlässigkeitsfaktor } D$$

R und D beziehen sich auf den Schalldruck und nicht auf die Schallenergie.

Für R bedeuten negative Werte, eine Umkehrung der Phase gegenüber der einfallenden Welle, positive Werte kein Phasensprung.

D kann größer oder kleiner 1 sein, was von Z_1 und Z_2 abhängt. Ist der Durchlässigkeitskoeffizient < 1 , handelt es sich um einen Übergang von einem Medium mit einem großen Schallwellenwiderstand zu einem Medium mit einem kleineren Schallwellenwiderstand Z (Stahl-Wasser).

Trifft die Welle schräg auf, kommt es zu Brechungen und Wellenumwandlungen [DGZFP, 1996].

Schallschwächung

Das Schallsignal ändert sich beim Durchlaufen eines Körpers mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle in Form und Amplitude. Dieses Phänomen wird als Schallschwächung bezeichnet, welche sich aus geometrischen Effekten wie Divergenz und physikalischen Mechanismen wie Streuung, Absorption und Dispersion zusammensetzt.

Divergenz bedeutet die Abnahme der Schallintensität mit dem Abstand im Quadrat oder die lineare Abnahme des Schalldrucks mit dem Abstand.

An einer Inhomogenität welche senkrecht zur Schallachse im Bereich der Wellenlänge der Schallwelle liegt, kann es neben der Reflexion oder der Beugung bei zu kleinen Abmessungen auch zur Schwächung der Schallwellen durch **Streuung** kommen.

Alle Effekte erhöhen den Rauschanteil im A-Bild („Gras“) erheblich und verschlechtern damit das Signal-Rausch-Verhältnis. Kleine Streukörper wie kleine Risse in Holz mit Durchmessern, die nur wenige Prozente der Wellenlänge entsprechen, haben auf das Signal geringeren Einfluss, große Streukörper mit Durchmessern ab 10 Prozent der Wellenlänge sind messbar. Die Streuung nimmt zusätzlich linear mit dem Schallweg zu und bei Probekörpern mit zu vielen Streukörpern kann das Signal-Rausch-Verhältnis so stark verändert werden, dass kein signifikantes Signal mehr erkannt werden kann.

Bei der **Absorption** wird ein Teil der Schallenergie in (Reibungs-) Wärme umgewandelt. Die Absorption nimmt linear mit dem Schallweg und linear mit der Frequenz zu [KRAUTKRÄMER, 1986]. Auch die **Dispersion** ist ein frequenzabhängiger Effekt, der Einfluss auf die breitbandigen Schallimpulse im Prüfkörper hat [SCHICKERT, 1999]. Die Schallgeschwindigkeiten der Einzelfrequenzen (Phasengeschwindigkeiten) weichen von der sog. Gruppengeschwindigkeit, d. h. der Schallgeschwindigkeit des Maximums der einhüllenden Intensitätskurve (Amplitudenpeak) ab, was bei einem zunehmenden Schallweg zu einer Aufweitung (Broadening) des ursprünglichen Impulses führt. Da die ausgesendete Schallenergie konstant bleibt, hat dies ein Absinken der Amplitude bei einer gleichzeitiger Zunahme der Pulsdauer zur Folge. Dieser Effekt ist bei Beton für Echountersuchungen bis 30 cm Tiefe vernachlässigbar, muss aber bei größeren Schalltiefen beachtet werden. Da Holzbalken mit Bauteildicken über 30 cm selten sind, muss die Dispersion nicht weiter berücksichtigt werden.

In dispersiven Medien hängt die Ultraschallgeschwindigkeit von der Frequenz ab und es kann eine **Phasengeschwindigkeit** und eine **Gruppengeschwindigkeit** gemessen werden.

$$V_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad \text{Gleichung 6: Gruppengeschwindigkeit}$$

$$V_p = \frac{\omega}{k} \quad \text{Gleichung 7: Phasengeschwindigkeit}$$

ω : Kreisfrequenz = $2\pi \cdot f$

k : Wellenzahl (setzt sich aus Betrag und Richtung zusammen)

Unter der Phasengeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit definierter Punkte in der Phase (Wellenberge, -täler und Nulldurchgänge) verstanden. Die Gruppengeschwindigkeit stellt die Geschwindigkeit des Maximums Wellenpaketes bzw. des Energietransports dar. Gruppen- und Phasengeschwindigkeit hängen von der elastischen und geometrischen Eigenschaft des Materials ab.

Insbesondere ist für akustische anisotrope Werkstoffe die Richtungsabhängigkeit dieser beiden Geschwindigkeiten wesentlich. Dies wird in Kapitel 5.3.1 (Abbildung 29). behandelt. Dabei können die Phasengeschwindigkeit und die Gruppengeschwindigkeit in unterschiedliche Richtungen laufen. Damit werden Gleichung 6 und Gleichung 7 vektoriell betrachtet.

5.2 Ultraschallverfahren und Darstellung der Ergebnisse

Bei der Anwendung von Ultraschallverfahren werden über einen piezoelektrischen Sender Schallwellen in den Probekörper eingebracht. Die Ankopplung der Prüfköpfe erfolgt bei Punktkontaktprüfköpfen (z. B. Exponentialhorn-Prüfköpfen) direkt, bei Zylinderprüfköpfen mittels Koppelmitteln wie Vaseline, Ultraschall-Gel oder Glycerin.

Durch seinen hohen Luftanteil kommt es bei Holz zu einer starken Schwächung der Schallwellen, was, wie bereits erläutert, leistungsstarke Prüfköpfe im Niederfrequenzbereich (50 - 200 kHz) erforderlich macht.

Die in den Probekörper eingebrachten Schallwellen werden mit meist baugleichen Empfangsköpfen gemessen und in der nachgeschalteten Messapparatur erfasst. Die Ultraschallverfahren werden nach der Art der Prüfkopfanzordnung in Durchschallungsverfahren und Echoverfahren unterschieden, wobei die Durchschallung mit einer Ankopplung über Luft einen besonderen Stellenwert hat.

5.2.1 Durchschallungsverfahren

(auch als Transmissions- oder Schattenverfahren bezeichnet)

Wie aus Abbildung 25 ersichtlich sind bei der Durchschallung Sender und Empfänger gegenüberliegend angeordnet. Bei den Messungen wird die abschattende und störende Wirkung von Werkstoff-Unregelmäßigkeiten auf das Schallverhalten genutzt. Die Durchschallungsverfahren unterscheiden sich aufgrund ihrer Messweise in Ultraschalllaufzeit-Verfahren, Intensitäts-Verfahren und Ultraschallfrequenz-Analyse.

Ultraschalllaufzeit-Verfahren

Das häufigste und am weitesten verbreitete Durchschallungsverfahren ist das Ultraschalllaufzeit-Verfahren. Dabei wird die Schalllaufzeit zwischen Sender und Empfänger gemessen (Abbildung 25). Dabei ist die genaue Lage der Prüfköpfe für die spätere Auswertung wichtig. Die Impuls-Laufzeit selbst ist von der Geometrie des Probekörpers und von den Probekörpereigenschaften (Feuchte, Dichte, Porosität, innerer Aufbau) und dem Erhaltungszustand (Fehlstellen, Risse, organische Schäden) abhängig. Aus den gemessenen Laufzeiten können bei bestimmten Anordnungen der Prüfköpfe wie z. B. dem schrittweisen Versetzen der Prüfköpfe auch tomographische Berechnungen durchgeführt werden.

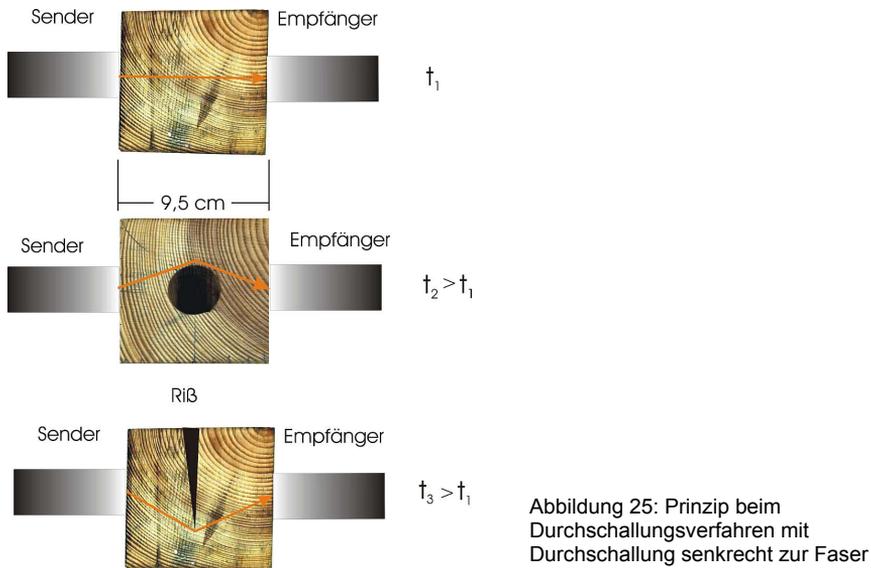


Abbildung 25: Prinzip beim Durchschallungsverfahren mit Durchschallung senkrecht zur Faser

Ultraschallintensitäts-Verfahren

Das Ultraschallintensitäts-Verfahren gleicht im Aufbau dem Ultraschalllaufzeit-Verfahren. Zusätzlich wird bei der Messung neben der Schalllaufzeit noch die Intensität des empfangenen Signals, d. h. die Höhe der ersten Schwingungsamplitude des Empfangssignals, ausgewertet. Da bei der Durchschallung eines Körpers die Intensität des Impulses je nach Bauteilgröße und Dämpfungskonstante geschwächt wird, kann mit der Schwächung eine Aussage über das Innere des durchschallten Probekörpers gemacht werden.

Der Vor- und Nachteil des Ultraschallintensitäts-Verfahrens ist, dass es sehr sensibel auf Störungen reagiert. Dies wird zur Ortung von Fehlstellen genutzt, stellt aber bei Störeffekten bei der Ankopplung ein großes Problem dar. Durch Koppelmittel wird versucht, eine reproduzierbare Ankopplung zu ermöglichen, was aber bei unebenen Probekörpern schwierig zu gewährleisten ist. Meistens überlagern aber die Intensitätsschwankungen der Ankopplung den gesuchten Effekt.

Ultraschallfrequenz-Analyse

Im Bereich der Prüfung mineralischer Baustoffe kann über die Ultraschallfrequenz-Analyse der Materialzustand charakterisiert werden. Dabei wird über einen Frequenz-Analysator die Intensität der einzelnen Frequenzanteile der Impulse, das Frequenzspektrum, ermittelt.

Durch die unterschiedliche Schwächung der einzelnen Frequenzanteile in Abhängigkeit des Werkstoffzustandes kann beispielsweise eine Aussage über das Erstarren oder Erhärten von Beton [JONAS 1997] oder Fäulnis bei Holz [HALABE, 1996] getroffen werden.

Ultraschallverfahren mit Ankopplung über Luft

Bisher wurde für die beschriebenen Ultraschallverfahren immer vorausgesetzt, dass eine direkte Ankopplung am Probekörper, meist mit Koppelmitteln, erforderlich ist. Dies ist bei einer Ankopplung über Luft nicht der Fall. Die Ultraschallmessung mit Ankopplung über Luft erfolgt in Transmission und vom empfangenen Signal werden meist die Laufzeit und die Intensität ausgewertet.

5.2.2 Echowverfahren

Eine genaue Lokalisation von Schadstellen mit laufzeitbasierten Ultraschall-Transmissionsverfahren birgt Schwierigkeiten [BEKHTA, 2002, HASENSTAB, 2002 (2)]. So kann beispielsweise die Laufzeit bei einer oberflächennahen oder tiefliegenden Schadstelle, einem großen Ast oder vielen kleinen Ästen nahezu identisch sein.

Wie der Name schon aussagt, wird beim Ultraschallecho-Verfahren das Echo einer vom Sendekopf ausgehenden Schallwelle vom Empfangskopf aufgenommen. Damit können beide Prüfköpfe auf einer Bauteilseite angebracht werden, und es können Bauteile bei nur einseitiger Zugänglichkeit untersucht werden, was eine größere Anwendungsbreite ermöglicht. Bei dem Echo-Verfahren wird die an einer Werkstoffunregelmäßigkeit oder Bauteilgrenze reflektierte Schallwelle gemessen. Über die Schalllaufzeit und die Bauteilabmessung ist bei Kenntnis der charakteristischen Schallgeschwindigkeit eine Bestimmung der Lage (Tiefe) und die Ausdehnung des Defekts möglich.

Seit Jahren wird Ultraschallecho im Niederfrequenzbereich (80 bis 200 kHz) im Bauwesen zur zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen eingesetzt. Dabei ist es möglich, Dickenbestimmungen (z. B. von Fundamentplatten oder Außenwänden) und Ortungen von Spankanälen durchzuführen [KRAUSE, 1999, SCHICKERT, 1999, KRAUSE, 2001, KROGGEL 2005].

Grundlegende Untersuchungen zur Anwendung von Ultraschall-Echo an Holz wurden an der BAM zusammen mit dem Fachgebiet für Baustoffe und Baustoffprüfung der Technischen Universität Berlin durchgeführt [HASENSTAB, 2002 (2)]. Darauf aufbauend entstand die vorliegende Arbeit.

Für die Echomessung an porösen Werkstoffen wie Beton und Holz ist ein kurzes, niederfrequentes Ultraschallsignal notwendig, was aber technisch bis vor etwa zehn Jahren nicht möglich war. Da ein Hauptteil der Arbeit mit Ultraschallecho durchgeführt wurde, wird für genauere Angaben zum Verfahren auf die Beschreibung des Experimentellen Aufbaus in Kapitel 6.2 verwiesen.

5.2.3 Darstellung der Ultraschallergebnisse

In der Ultraschallfachsprache werden die Ergebnisdarstellungen häufig als A-, B- und C-Bilder bezeichnet. Dabei wird unter einem **A-Bild** (Abbildung 26 links) der Intensitätsverlauf eines Messimpulses über die Laufzeit verstanden. Aus mehreren A-Bildern kann ein **B-Bild** (Abbildung 26 Mitte) zusammengesetzt werden, welches Laufzeiten der Schallechos als einen 2-D Längsschnitt entlang der Messachse des Bauteils darstellt. Wenn die gemessenen Laufzeiten mit der Schallgeschwindigkeit des Bauteils multipliziert werden, kann die „Tiefe“ des Echos im Bauteil angegeben werden und es ist möglich, aus dem Bild die Lage der

Materialinhomogenität direkt abzulesen. So ist es auch möglich, Messartefakte besser zu erkennen. Mit einem **C-Bild** (Abbildung 26 rechts) wird die Ultraschallamplitude in einem Schnitt durch den Probekörper parallel zur Oberfläche dargestellt. Die Lage der Ebenen zueinander ist in Abbildung 27 zu sehen.

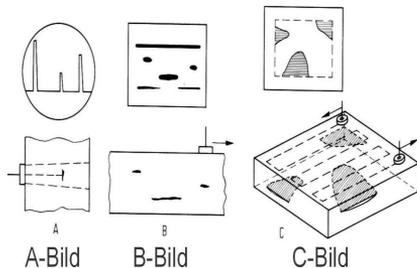


Abbildung 26: A-, B-, C-Bilddarstellung [KRAUTKRÄMER, 1986]

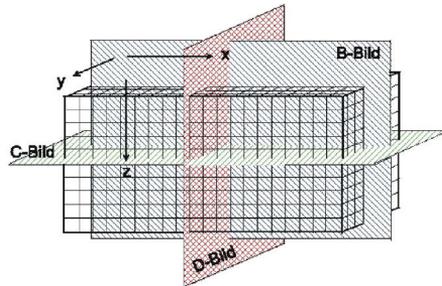


Abbildung 27: Lage der Projektionsebenen zueinander, wobei das D-Bild auch oft als B-Bild bezeichnet wird.

In der vorliegenden Arbeit werden zur besseren Sichtbarmachung von Echos gleicher Laufzeiten und einer besseren Vergleichbarkeit mit dem Probekörper B-Bilder verwendet. Zur genauen Auswertung der Intensitäten des Empfangssignals über die Zeit werden dann A-Bilder an ausgewählten Positionen dargestellt.

Sind viele Messpunkte mit einem geringen Messabstand vorhanden ist es möglich, aus diesem 3-D-Datensatz mit der 3D-SAFT-Rekonstruktion (**S**ynthetic **A**perature **F**ocusing **T**echnique) einzelne Schnitte bzw. Projektionen darzustellen.

5.3 Aspekte der Schallausbreitung in Holz

5.3.1 Auswirkung der Anisotropie

Holz ist ein anisotroper und inhomogener Werkstoff. Die Holzstruktur selbst besteht aus Fasern, die größtenteils längs zur Achse des Stammes orientiert sind. Senkrecht zur Faser gesehen sind die Fasern in Jahrringen angeordnet. Damit sind die Materialeigenschaften in den drei anatomischen Richtungen unterschiedlich.

Auch bestimmte Stähle, z.B. austenitische Stähle haben auch eine anisotrope Struktur. Diese Einflüsse auf die Schallausbreitung wurde im Rahmen einer Promotion an der BAM von [ERNST 2004] untersucht.

Bei Holz benennt man üblicherweise die drei anatomischen Richtungen als axial, radial und tangential (Abbildung 28). Dabei bedeutet axial bzw. longitudinal die Materialeigenschaft in Faserrichtung. Senkrecht zur Longitudinalrichtung wird noch in tangential, d. h. entlang des Jahrrings und radial, d. h. durch den Kern unterschieden.

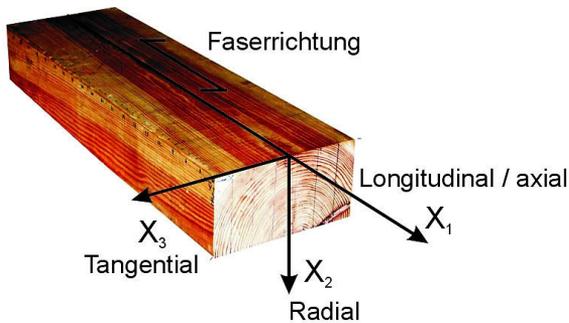


Abbildung 28:
Anatomische Richtungen
von Holz mit Lage der
Koordinatenachsen

In akustisch anisotropen Werkstoffen gibt es generell drei Wellenarten, deren Ausbreitungsgeschwindigkeiten im oben genannten Sinne richtungsabhängig sind. Diese Richtungsabhängigkeit wird üblicherweise in sogenannten Slownesskurven dargestellt [NEUMANN, 1995]. In solchen Diagrammen ist der Kehrwert der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Richtung aufgetragen. Für verschiedene Holzarten sind diese Abhängigkeiten z. B. von [BUCUR 2002 (1)] und [MUSGAVE, 1970] theoretisch und experimentell untersucht worden. Deren Berechnung erfolgt über die Christoffelgleichung [BUCUR, 2002 (3)].

Diese beschreibt neben dem Zusammenhang zwischen den elastischen Konstanten und den Geschwindigkeiten auch den Richtungskosinus, d. h. die Richtungsabhängigkeit der elastischen Konstanten, die Wellenausbreitung in anisotropen Medien. Auf verschiedene Hölzer wurde die Gleichung angewendet und Berechnungen durchgeführt [BUCUR, 2002 (2)].

Als Beispiel ist hier die Berechnung für Fichtenholz angeführt. Die Slownesskurven in Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen, dass in jeder der drei anatomischen Richtungen bis zu drei Arten von Wellen auftreten. Diese Wellen unterteilen sich in eine schnelle quasi Longitudinalwelle und, je nach Ausbreitungsrichtung in Bezug auf die Faserrichtung, in eine langsame Transversalwelle und eine schnelle quasi Transversalwelle.

In isotropen Medien stimmt die Richtung der Gruppengeschwindigkeit mit der Richtung des Wellenvektors überein. Zudem haben im verlustfreien Medium die Gruppen- und die Phasengeschwindigkeit den gleichen Wert (siehe z.B. [NEUMANN, 1995]).

Bei anisotropen Medien kommt es im allgemeinen zu einer Schallbündelablenkung, was bedeutet, dass sich das Intensitätsmaximum (die Gruppengeschwindigkeit) in der Richtung von den Wellenfronten (der Phasengeschwindigkeit) unterscheidet (Kapitel 5.1). Zudem ist die Gruppengeschwindigkeit immer größer als die Phasengeschwindigkeit [NEUMANN, 1995], außer in Richtung der ausgezeichneten Symmetrieachsen (Abbildung 29).

Die Richtungsabhängigkeit kann man nun in den folgend gezeigten Slownesskurven darstellen.

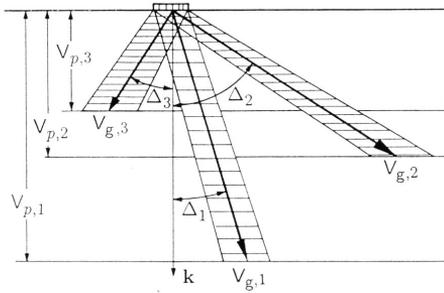


Abbildung 29: Die drei möglichen Ultraschallstrahlen als Vektoren im akustisch anisotropen Medium dargestellt am Beispiel der senkrechten Einschallung mit der Phasengeschwindigkeit \vec{V}_p und der Gruppengeschwindigkeit (\vec{V}_g) [NEUMANN, 1995]

Die Pfeile in den Abbildungen (Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32) stehen auf der Slownesskurve senkrecht und geben die Ausbreitungsrichtung der Schallintensität (Energie), d.h. des Wellenvektors der Gruppengeschwindigkeit an. In den ausgezeichneten Richtungen (longitudinal, radial, tangential) breiten sich die Wellen so aus, wie sie eingeleitet werden.

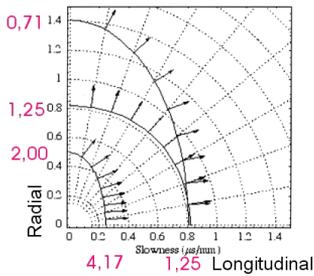


Abbildung 30: Slownesskurve von Fichte der Ebene longitudinal / radial in $\mu\text{s}/\text{mm}$, in rot die Geschwindigkeiten in km/s [BUCUR, 2002 (3)]:

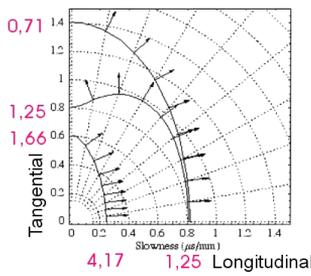


Abbildung 31: Slownesskurve von Fichte der Ebene longitudinal / tangential in $\mu\text{s}/\text{mm}$, in rot die Geschwindigkeiten in km/s

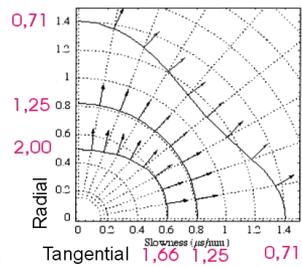


Abbildung 32: Slownesskurve von Fichte der Ebene tangential / radial in $\mu\text{s}/\text{mm}$, in rot die Geschwindigkeiten in km/s

Weitere Ergebnisse solcher Berechnungen sind in Abbildung 33 als dreidimensionale Slownesskurven dargestellt.

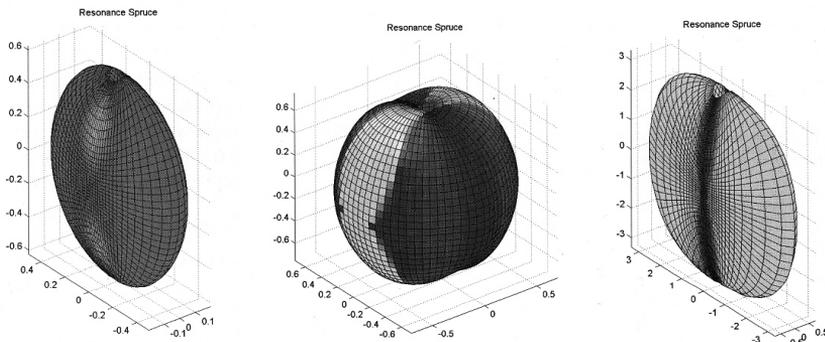


Abbildung 33: Slownesskurve von Fichte (resonance spruce), links: Longitudinalwelle, Mitte: schnelle Transversalwelle, rechts: langsame Transversalwelle [BUCUR, 2003]

Auch bei den physikalischen Modellen für Holz gibt es unterschiedliche Annahmen und Bezeichnungen. So werden homogene Stämme unter Berücksichtigung der Jahrringe als zylindrisch anisotrop bezeichnet [BUCUR, 1995]. Durch den Aufbau der Jahrringe wird Holz als konischer bzw. angenähert zylindrischer anisotroper Werkstoff angenommen [AICHER, 2002]. In anderen Quellen wird Holz als zylindrisch orthotrop [MARTIN, 2001, VERES, 2004] oder nur orthotrop [BUCUR, 1995, BERNDT, 1996] bzw. orthorombisch [FEENY, 1996] bezeichnet.

Das Ausbreitungsverhalten von Ultraschall in Holz setzt sich aus Einflüssen aus der Struktur des Holzes und den Fortpflanzungsphänomenen der elastischen Wellen zusammen.

Zum besseren Verständnis wurde hierfür folgendes Modell entwickelt [BUCUR 2002 (2)]: Holz besteht aus Zellulosefasern, die sich an der Wachstumsachse des Baumes orientieren. Diese Fasern selbst kann man sich als meist rechteckigen „Röhren“ aus Zellen vorstellen, die in eine amorphe Matrix, dem Lignin eingebettet sind. So besteht Holz aus einem sich rechtwinklig kreuzenden Röhrensystem (Abbildung 6). Diese axial orientierten Röhren werden von horizontalen Elementen, den Markstrahlen, gestört.

Die Übertragung des Schalls findet in den Wänden der Röhren statt, die in ihrer Gesamtheit schwingen. Dies bedeutet auch, dass sich die Streuung der Ultraschallwellen an den Verbindungspunkten verstärkt. Zudem ist wichtig, dass die Holzstruktur auf die Wellen wie ein frequenzabhängiger Filter wirkt und die Pulsform mit zunehmendem Laufweg verändert.

In der Ultraschalltechnik ist es üblich, die **Schallgeschwindigkeit** in nicht dispersiven, homogenen Materialien über die Laufzeit mit Hilfe eines Schwellwertes zu bestimmen. In der Vergangenheit wurde dies auch an Holz gemacht. Heterogene Materialien sind meistens dispersiv (frequenzabhängige Schallschwächung). Daher müssen beide Geschwindigkeiten in die Gruppengeschwindigkeit und die Phasengeschwindigkeit (siehe Kapitel 5.1) unterschieden werden. Hier ändert sich die Pulsform in Abhängigkeit vom Laufweg. Es hat sich in der Niederfrequenztechnik als Vorteil erwiesen, die Schalllaufzeit über das Pulsmaximum und nicht über den Einsatzzpunkt zu bestimmen.

Die **Schallgeschwindigkeiten und Schallschwächung variieren in Holz** sehr stark. Beispielsweise (Tabelle 5) ist die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen bei Fichte in Faserrichtung mit 6000 m/s am höchsten und die Schallschwächung am geringsten mit 2 dB/cm. Genau entgegengesetzt ist dies bei der Scherwelle mit tangentialer Schwingung (senkrecht zur Faser), wo sich die geringste Schallgeschwindigkeit von 400 m/s und die größte Schallschwächung von 15 dB/cm ergibt [BUCUR, 1999].

Ein Vergleich der unterschiedlichen Ergebnisse ist schwierig, da die veröffentlichten Daten durch die unterschiedliche Probekörperart, Versuchsaufbau, Pulsform und Ultraschallfrequenz stark variieren [RIGGER, 2003].

Auch ist die Anisotropie bei unterschiedlichen Holzarten verschiedentlich stark ausgeprägt. So ergaben Untersuchungen, dass der Einfluss des Faserwinkels auf die Schallgeschwindigkeit bei Fichte ausgeprägter ist als bei Buche (siehe Abbildung 34). Diese Ergebnisse wurden von [RIGGER, 2003] bestätigt.

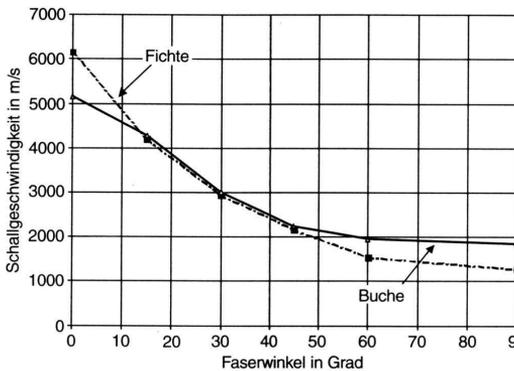


Abbildung 34: Unterschiedlicher Einfluss des Faserwinkels auf die Schallgeschwindigkeit bei Fichte und Rotbuche. (bei 0° axiale / longitudinale Richtung, ob die Winkeländerung in radialer oder tangentialer Richtung erfolgt, ist der Literaturstelle nicht zu entnehmen.) [NIEMZ, 1999].

Modellierungen zur Schallausbreitung an Holz wurden von [VERES, 2004, SCHUBERT, 2005 (1)] durchgeführt.

Modell für Longitudinalwellenausbreitung in Holz

Die **unterschiedlichen Geschwindigkeiten für Longitudinalwellen** lassen sich über den Aufbau des Holzes erklären. Longitudinalwellen in Faserrichtung pflanzen sich längs der Fasern sehr gut fort. Gestreut werden die Wellen an Inhomogenitäten wie den Faserenden. Dies bedeutet, dass mit einer Zunahme der Faserlängen eine Zunahme der Schallgeschwindigkeit einhergeht [POLGE, 1984]. Daraus ergeben sich die bereits erwähnte hohen Schallgeschwindigkeiten und geringen Dämpfungen in longitudinaler (axialer) Richtung.

Die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten in radialer und tangentialer Richtung hängen mit dem mikroskopischen Aufbau zusammen. So machen beim Nadelholz etwa 10 % des Volumens die Markstrahlen aus [ROSNER, 2005], die als Röhren in radialer Richtung verlaufen und ähnlich wie bei den Fasern in axialer Richtung den Schall gut übertragen. Für die Schallübertragung in radialer Richtung bedeutet dies, dass diese geringer ist als in axialer Richtung, aber höher als in tangentialer Richtung [BUCUR, 1996]. In tangentialer Richtung existieren keine kontinuierlichen strukturellen Elemente und so verwundert es nicht, dass hier die Dämpfung am höchsten und die Schallgeschwindigkeit am niedrigsten ist.

Die Berücksichtigung der Anisotropie ergab für die Schallemissionsanalyse eine sehr große Verbesserung bei der Rückrechnung der Schallquellen [RIGGER, 2003]. Dabei wurde zwischen der axialen Faserrichtung und radialer/tangentialer Richtung unterschieden, was die Anisotropie bei zusammengesetzten Bauteilen wie Brettschichtholz berücksichtigt welches sich aus mehreren Brettern mit hohem tangentialem und radialem Anteil zusammensetzt. Hierbei konnte auch gezeigt werden, dass sich die Ergebnisse hier von Messungen an kleinen Probekörpern gut auf große Probekörper übertragen lassen [RIGGER, 2003].

Modell für Transversal- (Scher-)wellenausbreitung in Holz

Die Teilchen schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Abbildung 23). Diese Polarisationsrichtung muss bei einer Ausbreitung der Scherwelle in Holz beachtet werden. Messungen im Rahmen der Arbeit an einigen Kiefernkörpern ergaben, dass für eine Durchschallung in axialer Richtung der Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit sehr gering ist.

Einen deutlicheren Einfluss des Polarisationswinkels auf die Schallgeschwindigkeit ist bei einer Ausbreitungsrichtung in radialer Richtung zu erkennen. Noch ausgeprägter ist dieser Einfluss in tangentialer Richtung [BUCUR, 1998]. Für alle drei anatomische Richtungen gilt, dass die Schallschwächung bei einer Schwingungsrichtung senkrecht zur Faser sehr hoch ist. Auch haben Scherwellen mit der Schwingungsrichtung parallel zur Faser etwa doppelt so hohe Schallgeschwindigkeiten wie mit einer Polarisation senkrecht zur Faser

$$(v_{\text{Transwelle_parallel}} = 1,52 \frac{\text{km}}{\text{s}}, v_{\text{Transwelle_senkrecht}} = 0,75 \frac{\text{km}}{\text{s}}) \text{ [SASKI, 2000].}$$

Zahlenwerte für die Schallgeschwindigkeiten in den unterschiedlichen anatomischen Richtungen können Kapitel 6.5.5 entnommen werden, in dem die Messergebnisse im Rahmen der Arbeit mit Messdaten aus der Literatur (Tabelle 5) verglichen werden.

5.3.2 Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit wird bei der Untersuchung von Probekörpern von vielen Parametern beeinflusst. Besonders ausgeprägt ist dies bei Holz, das beispielsweise durch seine organische Entstehung, seine Anisotropie und sein hygroskopisches Verhalten viele unterschiedliche Materialeigenschaften und Materialzustände besitzen kann.

Die Geschwindigkeit einer Schallwelle wird von Materialeigenschaften wie der Baumart, der Rohdichte, der Jahringstruktur, von Holzfehlern wie Ästen und Reaktionsholz und der Faserlänge beeinflusst.

Auch der Laufweg bezogen auf die Faser und Materialzustände wie die Holzfeuchte, statische Lasten auf dem Bauteil, Abmessungen der Bauteile und die Holztemperatur sowie der Anpressdruck der Prüfköpfe, Verunreinigungen durch Salze und Koppelmittel beeinflussen die Schallgeschwindigkeit.

Aus der Vielzahl dieser Einflüsse werden folgend einige kurz beschrieben.

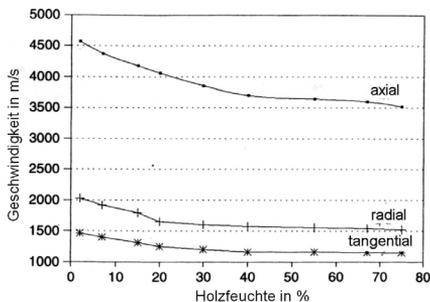


Abbildung 35: Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Holzfeuchte (Masseprozent) [KABIER, 1998]

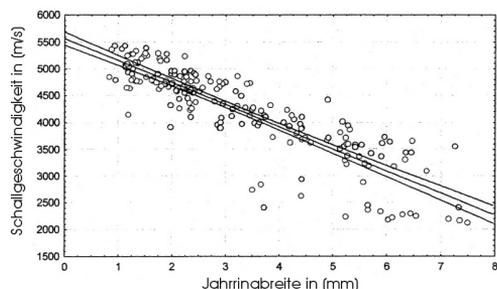


Abbildung 36: Einfluss der Jahringbreite auf die Schallgeschwindigkeit (v_{LL}) bei Fichte [HAUFFE, 2000]

Die akustische **Anisotropie** von Holz wurde bereits detailliert behandelt. Untersuchungen der **Jahringstruktur** ergaben, dass die breiten Bereiche des Frühholzes eine geringere Dichte und eine viel geringere Schallgeschwindigkeit als das Spätholz besitzen. In Zahlenwerten ausgedrückt bedeutet das für altes Holz nach [FEENEY, 1996]

$\rho_{\text{Frühholz}} = 600 \text{ kg/m}^3$ mit $v_{\text{Frühholz}} = 1800 \text{ m/s}$ und $\rho_{\text{Spätholz}} = 700 \text{ kg/m}^3$ mit $v_{\text{Spätholz}} = 2300 \text{ m/s}$, bei jungem Holz variieren die Dichten stärker. In anderen Ansätzen wird davon ausgegangen, dass die Dichte des Frühholzes halb so groß ist wie die des Spätholzes [BUCUR, 1995]. Zusätzlich kommt es bei zunehmender **Jahringbreite** zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit [HAUFFE, 2000] (Abbildung 36).

In wie weit diese geschichtete Struktur Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit hat ist in der Fachwelt umstritten.

Der Einfluss der **Faserlänge** auf die Schallgeschwindigkeit zeigt sich in der Korrelation von $r = 0,90$ zwischen der Faserlänge und der axialen Ultraschallgeschwindigkeit [POLGE, 1984].

In vielen Untersuchungen wird der starke Einfluss des **Feuchtegehaltes** auf die Ultraschallgeschwindigkeit beschrieben [KESSEL, 1990, NIEMZ, 1995 (2), OLIVITO, 1996, KABIR, 1998, PALIA PEREZ, 2000, SOMA, 2000, NIEMZ, 2001, BEKHATA, 2002], der sich als starke Abnahme der Schallgeschwindigkeit bei einer Feuchtezunahme äußert. Dies trifft sowohl für die Schallgeschwindigkeiten in alle drei anatomischen Richtungen als auch bei niedrigen und hohen Frequenzen zu [KABIR, 1998]. Ein Frost der Feuchte im Holz führt zu einem starken Anstieg der Schallgeschwindigkeit [SOMA, 2000]. Auch eine Zunahme der **Holztemperatur** hat einen Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit zur Folge [KANG, 2002], wobei dieser Effekt bei Spanplatten genau entgegengesetzt ist [BEKHATA, 2002].

Die Fragestellung, ob mit einer Zunahme der **Rohdichte** automatisch eine Zunahme der Schallgeschwindigkeit einhergeht, wurde intensiv untersucht [BARTLOMIEJ, 1977, KESSEL, 1990, NIEMZ, 1995 (2)] und ergab, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen beiden Parametern besteht. Dies liegt z. B. daran, dass einer Schallgeschwindigkeit mehrere Rohdichten von verschiedenen Hölzern [JORDAN, 1998] oder sogar bei einem Holz eine Rohdichte vom Kernholz und eine Rohdichte vom Splintholz zugeordnet werden kann [BURMESTER, 1967, BARTLOMIEJ, 1977].

Holzfehler wie **Äste** [BURMESTER, 1967, SCHMOLDT, 1994], **Risse** und **Bohrungen** [NIEMZ, 1999, HASENSTAB, 2002 (2)] können z. B. durch einen erzwungenen Umweg die Schalllaufzeit erhöhen.

Auch **Fäulnis** verursacht eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit (bis zu über 50 %) [SCHWARZE, 1994, JAYAKUMAR, 2003], wobei die stärkste Abnahme bei Braunfäule, eine geringere Geschwindigkeitsabnahme bei Weißfäule und die geringste Abnahme der Schallgeschwindigkeit bei Moderfäule zu verzeichnen ist [SCHWARZE, 1994].

Auch verwendete Koppelmittel können einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit haben [HALABE, 1996].

Die vielfachen Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit haben zur Folge, dass in den beschriebenen Versuchen im Rahmen der Arbeit mit Transmission und Echotechnik die Werte nur bezogen auf das jeweilige Bauteil angegeben werden können.

5.3.3 Schallübergang und Reflexionen an praxisrelevanten Grenzflächen

Das Ultraschall-Echoprinzip beruht auf der Reflexion von Schallwellen an Grenzflächen. Nach der Ankopplung der Prüfköpfe, direkt oder mittels Koppelmittel, kann das Signal beispielsweise an folgenden Schallübergängen reflektiert werden:

Übergang Holz → Luft (Bauteilrückseite, Riss, aufeinander liegende Balken)

Übergang Holz → Holz (Früh-/Spätholz)

Übergang Holz → Leim (BSH- Binder)

Übergang Holz → Ast

Übergang Holz → Schädigung

Übergang Holz → Luft (frei liegender Balken, Riss, aufeinander liegende Balken)

Der Übergang von Holz zu Luft verursacht eine Totalreflexion und kommt an Holz praktisch an der Rückwand des Bauteils, an ausgeprägten Rissen wie auch Ablösungen vor. Dies gilt auch für den geringen Luftspalt zwischen zwei aufeinander liegenden Balken. Unter Verwendung von Gleichung 4 ergibt sich beim Übergang von Holz

($Z = 1800 \frac{m}{s} \cdot 490 \frac{kg}{m^3} = 882000 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$) zu Luft ($Z = 331 \frac{m}{s} \cdot 0,0013 \frac{kg}{m^3} = 0,4303 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$) der

Reflexionsfaktor $R = \frac{0,43 - 882000}{0,43 + 882000} = -1$ (mit Phasensprung) und der Durchgangsfaktor $D=0$.

Übergang Holz → Holz (Früh-/Spätholz)

Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben besteht Holz makroskopisch aus Jahrringen, die aus Früh- und Spätholz bestehen. Bei Untersuchungen senkrecht zur Faser kommt es so zu einem Schallübergang von weichem Frühholz zu hartem Spätholz.

Auf Messungen mit hohen Frequenzen und damit sehr kleinen Wellenlängen im Bereich der Jahrringbreite haben die Jahrringe einen direkten Einfluss und es kommt zu Reflexionen. Nach übereinstimmenden Aussagen kommt es durch die niedrigen Frequenzen mit Wellenlängen von etwa 2 cm sowohl bei Longitudinal- und Transversalwellen durch die Jahrringe nur zu einer dämpfenden Wirkung [BUCUR, 2005, DILL-LANGER, 2005, SCHUBERT, 2005 (2)].

Übergang Holz → Leim

Ein Brettschichtholz-Träger besteht aus zusammengeleimten Brettern mit einer Dicke von etwa 3 cm. Einige Messungen zeigten, dass es zu Reflexionen im BSH-Träger kommt, die den Leimfugen zugeordnet werden können. Um das Prüfziel eines Echos der Rückwand zu erreichen wurde die Prüffrequenz reduziert, was dann, mit der höheren Wellenlänge zu einer Reduzierung der Echos an den Lamellen führte und Echosignale der Bauteilrückseite ermöglichte.

Übergang Holz → Ast

Oberflächennahe Äste können das Ultraschallsignal erheblich beeinflussen, indem es zu direkten Reflexionen, transmittiertem Schall und Beugung kommen kann. Je nach Lage und Abmessung des Astes kann das Rückwandsignal durch Echos am Ast überlagert werden oder ganz abgeschattet werden. Da die Messungen meist entlang der Längsachse des Balkens verlaufen, ist die Störung nur örtlich begrenzt und im B-Bild ist dann eine räumlich sehr begrenzte Störung zu sehen. Ist der Ast lose, kann das Astloch wie ein Loch angesehen werden, was einem Schallübergang Holz zu Luft entspricht. Mit der Annahme einer

dreifachen Dichte des Astes gegenüber dem restlichen Holz und einer gleichen Schallgeschwindigkeit ergibt sich nach Gleichung 4 $R_{\text{Holz - Ast}} = 0,5$ und Gleichung 5 $D_{\text{Holz - Ast}} = 1,5$.

Übergang Holz → Schädigung

Ist die Schädigung ein Riss oder eine Bohrung gilt der Übergang Holz zu Luft. Ist die Schädigungen durch Fäulnis verursacht, kommt es zu einer Abnahme der Holzsubstanz was zu einer Reduzierung der Schallgeschwindigkeit führen kann. Durch die Dichteabnahme und kleinen Rissen durch Würfelbruch wird die Schallwelle in Wärme umgewandelt und ein Empfang von Echosignalen ist nicht möglich.

6 Verwendete Ultraschallverfahren

Im folgenden Kapitel wird nach einer Präzisierung der Fragestellung der experimentelle Aufbau mit seinen Komponenten erklärt. Auf die Optimierung der Ankopplung folgend wird in Abhängigkeit der Prüfoberfläche das Ausbreitungsverhalten der niederfrequenten Longitudinal- und Transversalwellen mit seinen Besonderheiten in Bezug auf die Faser anhand von eigenen Messergebnissen gezeigt.

Nach der Untersuchung der Einflüsse aus Sendesignal, Frequenz und Prüfköpfe auf die Ergebnisse und der Messunsicherheit wurden die unterschiedlichen Geschwindigkeiten für die Longitudinal- und Transversalwellen anhand eigener Ergebnisse dargestellt und mit Literaturwerten verglichen.

Messungen mit Laufzeitkorrigierter Überlagerung und SAFT werden ebenso dargestellt wie Messungen mit einer Ankopplung über Luft.

6.1 Präzisierung der Fragestellung nach Bearbeitung der Grundlagen

Trotz Literaturrecherche wurden bis Ende 2004 keine Veröffentlichungen außer den eigenen zur erfolgreichen Anwendung des Ultraschallecho-Verfahrens an Holz gefunden. Die einzige, nicht eigene Arbeit entstand an der TU Darmstadt im Zuge der wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit der BAM 2005 [LUTZ, 2004]. Nach der Anwendung von Ultraschallecho mit Longitudinalwellen zur Ortung künstlich eingebrachter Fehlstellen in Holzkörpern und vielversprechenden Vorversuchen wurde die Problemstellung der Ortung von verdeckten Fehlstellen konkretisiert.

Zur Beantwortung der grundlegenden Überlegungen, ob auch mit niederfrequenten Transversalwellen die Anwendung von Ultraschallecho-Verfahren möglich ist, ob damit Hohlstellen und Minderdicken in Holzbauteilen geortet werden können und ob sich Longitudinalwellen oder Transversalwellen besser zur Untersuchung von Holz eignen, stellten sich nun folgende Fragen:

Messtechnik:

- Welche Möglichkeiten existieren zur praxisgerechten Verkleinerung der Apparatur der BAM und unter welchen Bedingungen ist ein Messen des Rückwandechos mit dieser Apparatur mit Transversalwellen möglich?
- Welche der Punktkontaktprüfköpfe für Longitudinalwellen und Transversalwellen sind für Echomessungen an Holz besser geeignet und mit welcher Ansteuerung der Prüfköpfe d. h. Prüffrequenz, S/E-Betrieb oder Array wird dies erreicht?
- Für welche Probekörperoberfläche ist welche Ankopplung bezogen auf die Faser für Longitudinalwellen und Transversalwellen geeignet?
- Wie groß ist die tote Zone der Prüfköpfe A1220 durch Oberflächenwellen?

Grundlagen:

- Welchen Einfluss hat die Polarisationsrichtung der Transversalwellen in Bezug auf die Faserrichtung?
- Gibt es Unterschiede der Echos bei einer Anordnung der Prüfköpfe mit der Verbindungslinie zwischen den Prüfköpfen parallel oder senkrecht zur Faser?

Ziele:

- Welche Schallgeschwindigkeiten der Transversalwellen treten in den verschiedenen anatomischen Richtungen auf und wie verhalten sich diese Ergebnisse im Vergleich zu Literaturwerten?
- Können mit der verwendeten Messapparatur Schäden (z. B. Fäule, Risse in BSH) detektiert werden und bis zu welcher Mindestgröße ist es möglich, die Tiefe und Ausdehnung des Schadens zu bestimmen?
- Welche Art und wie genau sind Minderdicken detektierbar?
- Bis zu welchen Bauteilabmessungen ist ein Rückwandecho mit Longitudinalwellen bzw. Transversalwellen zu empfangen?
- Unterscheiden sich radiale und axiale Schäden in ihrer Detektierbarkeit?

6.2 Experimenteller Aufbau

Die Messapparatur besteht aus einem Sender, der mit einem verstärkten Signal angeregt wird und einer Datenaufnahme, die die empfangenen, verstärkten Signale aufnimmt. Dieser prinzipielle Messablauf ist in Abbildung 37 dargestellt.

Zu Beginn der Arbeit wurde eine neue, eigenständige, baulich verkleinerte Messapparatur für die Ultraschallgruppe der Fachgruppe aufgebaut, um die Messungen unabhängig von den anderen Ultraschallexperimenten an der BAM durchführen zu können.

Dafür wurde ein PC mit einer Analog-Digital-Umsetzkarte (PCI-Karte von National Instrument NI 6111 E64/SE) zur direkten Messdatenaufnahme umgebaut. Hier wurden Teilaufgaben für die Programmierung der Datenaufnahme und des Datentransfers in LabVIEW unter Betreuung von Herrn Mielentz (BAM IV.4) übernommen. Zusätzlich wurden Verstärker den Erfordernissen entsprechend bei der Elektronikabteilung S.21 der BAM entwickelt und gebaut und die neuen Komponenten an die Anwendung angepasst. Ein weiterer Schwerpunkt bestand darin, dass jede Veränderung der ursprünglichen Messapparatur durch Vergleichsmessungen an Referenzkörpern überprüft wurde.

Zur Durchführung der Messungen standen sowohl eine Entwicklungsapparatur (Abbildung 39) mit vielen Variationsmöglichkeiten der Einstellungen und der Geräte als auch ein kleines, kommerzielles Gerät zur Verfügung (Abbildung 40).

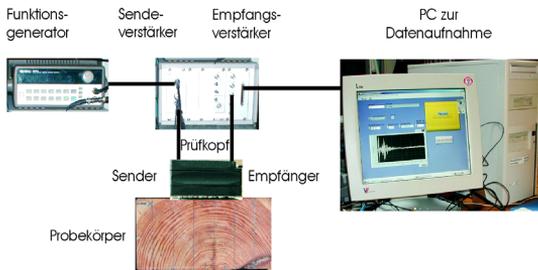
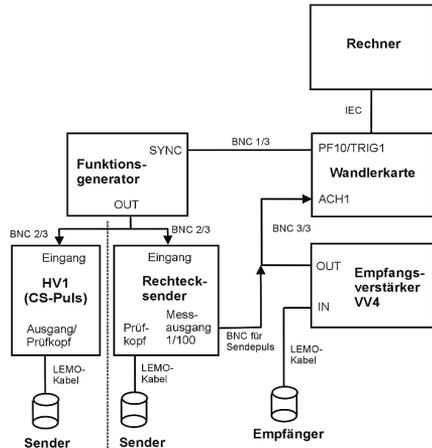


Abbildung 37: Prinzipieller Aufbau der Messapparatur, bestehend aus Funktionsgenerator, Sendeverstärker, S/E Prüfkopf, Empfangsverstärker und PC zur Datenaufnahme

Rechts: Abbildung 38: Blockschaltbild der Messapparatur, wahlweise mit CS-Puls oder Rechtecksender (abgegrenzt mit gestrichelter Linie)

Messaufbau für Rechtecksender oder CS-Puls



Funktionsgenerator
Verstärker Rechner mit PCI-Datenaufnahme-Karte

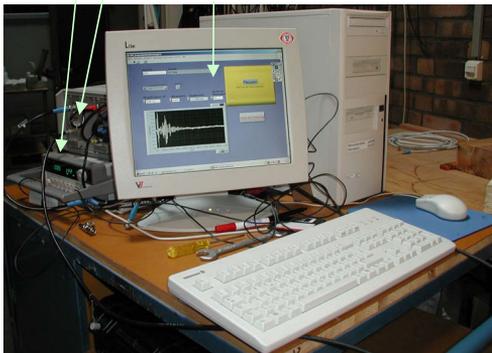


Abbildung 39: Entwicklungsapparatur zur Ultraschall-Echomessung mit Analog-Digital-Umsetzerkarte in PC



Abbildung 40: A1220 der Firma ACSYS

Zu Beginn jeder Messung wurde am Referenzprobekörper R eine Kalibrierungsmessung durchgeführt, um damit die Signalform und die Laufzeit zu bestimmen, mit der dann ein Vergleich der errechneten Schallgeschwindigkeit mit bekannten Werten möglich ist und so die einwandfreie Funktion der Apparatur gewährleistet wird.

6.2.1 Verwendete Sendepulse und Verstärker

Sendepuls

Als Sendepuls wurde entweder der programmierte Impuls RC3 (Abbildung 41) oder ein Rechteckimpuls verwendet. Beide Impulse wurden mit dem Frequenzgenerator HP 33120 A

der Firma Hewlett Packard (Abbildung 37 links) erzeugt, wobei für den Rechteckimpuls noch ein Rechtecksender gebaut wurde. Dieser erzeugt bei einer festen Frequenz von 55 kHz ein Rechtecksignal mit einer Impulslänge von 9,09 μs und einer Spannung von $\pm 200\text{ V}$.

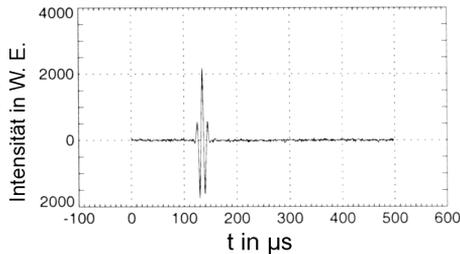


Abbildung 41: Sendepuls RC3 oder CS-Signal, optimiert für niederfrequentes Ultraschallecho an Beton mit dem Ziel wenige Oberflächenwellen zu erzeugen. Impulslänge etwa 20 μs , hier Mittenfrequenz $f = 100\text{ kHz}$

Verstärker

Im Rahmen der Minituarisierung der Messapparatur wurde der bisher verwendete Leistungsverstärker durch einen baulich sehr viel kleineren Hochspannungsverstärker (Abbildung 37 Mitte) ersetzt, der eine maximale Verstärkung von 50 hat und maximale Signale von $\pm 150\text{V}$ erzeugen kann.

Dieser Verstärker ist bei der Anwendung des Rechtecksenders nicht erforderlich, da dieser, wie beschrieben, eine eigene Verstärkung besitzt. Als Empfangsverstärker wurde ein baulich sehr kleiner Vorverstärker verwendet, der die niedrigen Ultraschallsignale bis um das 10000-fache verstärken kann. Die Verstärker wurden als Eigenbau der BAM von der Abteilung S.31 gefertigt.

6.2.2 Prüfköpfe zur Anregung von Longitudinal- und Transversalwellen

Die verwendeten Prüfköpfe bestehen aus piezoelektrischen Elementen, die den elektrischen Impuls in einen Ultraschallimpuls umwandeln. Dieser Effekt ist umkehrbar und so können die Prüfköpfe sowohl als Sender als auch als Empfänger verwendet werden [KRAUTKRÄMER, 1997, DGZFP, 1999].

In der Ultraschallmessung spielt die Bauart und die Schwingungsart der Prüfköpfe eine große Rolle. Besonders bei Echomessungen können bei einem langen Schallimpuls intensiven Oberflächenwellen das Echosignal überlagern und so eine Auswertung erschweren.

Um Echomessungen durchführen zu können ist daher ein kurzer Schallimpuls notwendig, der mit stark gedämpften, breitbandigen Prüfköpfen erreicht wird (Abbildung 42). Gering gedämpfte Prüfköpfe hingegen erzeugen ein Sendesignal mit langer Sendedauer („langer Puls“) (Abbildung 43) und schwingen lange nach („klingeln“).

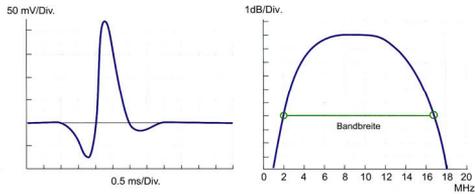


Abbildung 42: Piezoelektrischer Wandler mit starker Dämpfung = kurze Impulsdauer mit großer Bandbreite. Besonders geeignet für grobes Material, hohe Auflösung [KRAUTKRÄMER INFORMATIONSPOSTER].

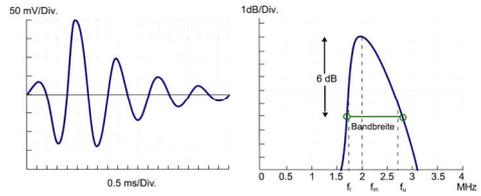


Abbildung 43: Piezoelektrischer Wandler mit schwacher Dämpfung = langer Impuls mit ausgeprägter Frequenz und schmaler Bandbreite [KRAUTKRÄMER INFORMATIONSPOSTER].

Die zusätzlichen inneren Reflexionen bei porösen, inhomogenen Werkstoffen wie Beton und Holz, das Kornrauschen, erfordern für eine Untersuchung mit Ultraschall in Echoanordnung niederfrequente, stark gedämpfte Prüfköpfe.

In der Vergangenheit standen der Forschung im Niederfrequenzbereich nur schmalbandige Schallköpfe mit geringer Dämpfung zur Verfügung. Durch die technische Weiterentwicklung der Schallköpfe ist es nun seit 1993 mit den Prüfköpfen 0,1 K von Krautkrämer möglich, auch hier einen „kurzen“ Impuls (Abbildung 42), d. h. einen Impuls kurzer Impulsdauer, in den Probekörper zu senden. Die große Bandbreite des Senders bzw. Empfängers bedeutet, dass viele Frequenzkomponenten des Sendesignals durch den Sender/Empfänger im gleichen Maß gedämpft werden und so eine Analyse der Dämpfung durch das Bauteil möglich ist.

Bei Ultraschallecho-Verfahren wird entweder ein Prüfkopf als Sender und Empfänger angesteuert oder es werden zu diesem Ziel zwei getrennte Prüfköpfe verwendet (S/E). Um der hohen Dämpfung in Holz und Beton entgegenzuwirken, muss der Sendeimpuls verstärkt werden, was zur Folge hat, dass der Prüfkopf bei der niedrigen Frequenz (100 kHz) länger nachschwingt und so erst Echos ab einer bestimmten Tiefe messbar sind.

Eine elektronische Trennung von Senden und Empfangen bei hoher Sendeenergie ist mit den vorhandenen Prüfköpfen für Einkopfbetrieb nicht möglich und so wird bei den weiteren Versuchen der S/E-Betrieb mit zwei Köpfen angewendet. Mit einigen kommerziellen Geräten ist Einkopfbetrieb möglich.

Longitudinalwellenprüfköpfe

Für die Messungen mit Longitudinalwellen wurden die zylindrischen Prüfköpfe G 0,2 GC (Abbildung 44 rechts) und die Punktkontaktprüfköpfe LD120 (Abbildung 45) verwendet. Die in der Betonprüfung häufig verwendeten Prüfköpfe G0,2R (Abbildung 44 links) wurden aufgrund der großen Wandlerdurchmesser nicht mehr verwendet, sind aber prinzipiell auch für Messungen an Holz geeignet [HASENSTAB, 2002 (2)].



Abbildung 44: breitbandige Longitudinalwellenprüfköpfe von Krautkrämer mit einer Mittenfrequenz von 200 kHz. Links G 0,2 R (Durchmesser 79 mm), rechts G 0,2 GC 34 (Durchmesser 45 mm, Wandlergröße 34 mm, Prüfkopfhöhe 100 mm)



Abbildung 45: Punktkontaktprüfkopf für Longitudinalwellen: LD 120 mit 120 kHz Mittenfrequenz; für Transversalwellen: TD 20 oder TR 1802 mit 55 kHz Mittenfrequenz von ACSYS (ohne Koppelmittel)

Bei stark dämpfenden Materialien haben die Prüfköpfe G 0,2 GC eine Vorlaufzeit von 2 μ s. Diese entsteht aus einer Verzögerung zwischen den elektrischen Sendepulsen und dem Beginn der mechanischen Schwingung, dem Startzeitpunkt der Welle im Bauteil. Bei der Auswertung wird dies in Form einer Subtraktion von 2 μ s von allen Schalllaufzeiten berücksichtigt.

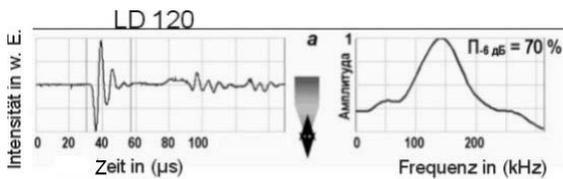


Abbildung 46: Signalform und Frequenzspektrum der Longitudinalwellenprüfköpfe LD 120 bei 120 kHz [ACSYS, 2005]

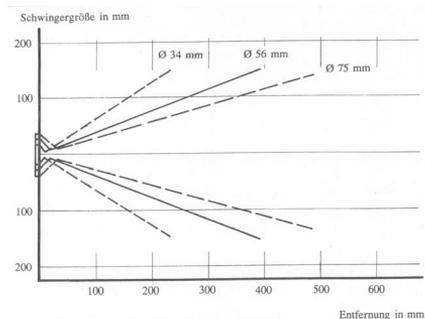


Abbildung 47: Schallkegel unterschiedlicher Prüfköpfe bei 100 kHz [KRAUTKRÄMER, 1997]

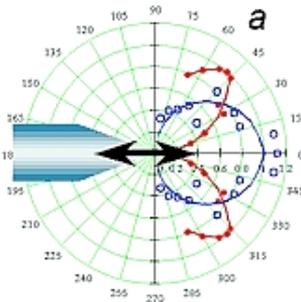


Abbildung 48: Ausbreitungscharakteristik des Longitudinalwellenprüfkopfs LD 120, Messung an der BAM, Veröffentlichung bei [ACSYS, 2005]

Untersuchungen ergaben, dass mit den Punktkontaktprüfköpfen LD120 keine Echos erzielt werden konnten. Dies ist möglicherweise auf die, im Vergleich zu den zylindrischen Prüfköpfen G 0,2 GC viel geringere Schallenergie, zurückzuführen. Da diese Prüfköpfe für Echomessungen an Holz mit Dicken von etwa 10 cm nicht geeignet waren, wurden sie in den weiteren Untersuchungen nicht mehr verwendet.

Transversalwellenprüfköpfe

Die Messungen mit Transversalwellen wurden mit Punktkontaktprüfköpfen durchgeführt. Dabei wurden sowohl die einzelnen Prüfköpfe TD20 (Abbildung 45), als auch das Prüfkopfarray A1220 (Abbildung 49) eingesetzt. Das Array besteht aus 24 Prüfköpfen TD20, wobei 12 Prüfköpfe als Sender und 12 als Empfänger geschaltet werden. Die Schwingungsrichtung der Transversalwellenprüfköpfe ist in Abbildung 50 dargestellt und ist bei der Ankopplung an Holz von großer Bedeutung (siehe Kapitel 6.5.2). Von sehr großem Vorteil gegenüber den zylindrischen Longitudinalwellenprüfköpfen ist, dass die 2 mm breiten Punktspitzen aus Keramik für die Ankopplung keine Koppelmittel benötigen. Dies macht eine einfache und vielfältige Anwendung an dem starken saugfähigen Werkstoff Holz möglich.

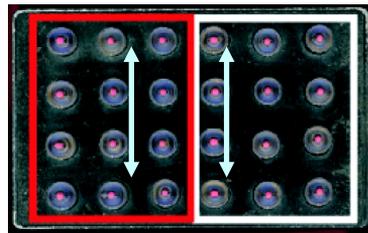


Abbildung 49: Sende/Empfangseinheit A1220 mit 24 Punktkontaktprüfköpfen von ACSYS (145 mm x 90 mm x 75 mm, 0,76 kg)

Abbildung 50: Unteransicht der Sende/Empfangseinheit A1220 mit Schwingungsrichtung der Punktkontaktprüfköpfe, wobei 12 als Sender und 12 als Empfänger angesteuert werden

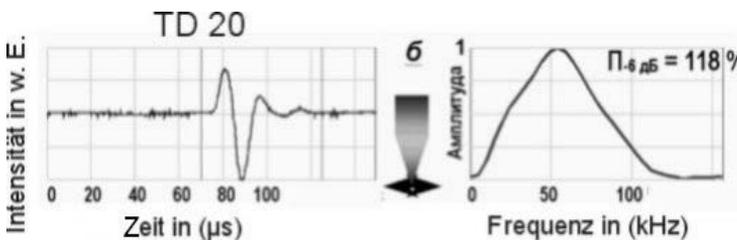


Abbildung 51: Signalform und Frequenzspektrum der Transversalwellenprüfköpfe TD 20 bei 55 kHz [ACSYS, 2005]

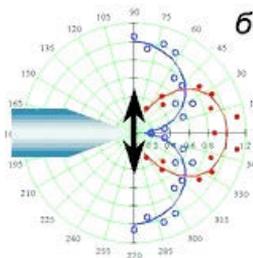


Abbildung 52: Schallfeld der Transversalwellenprüfköpfe TD 20 mit Polarisation in Zeichenebene, Messung an der BAM, Veröffentlichung bei [ACSYS, 2005].

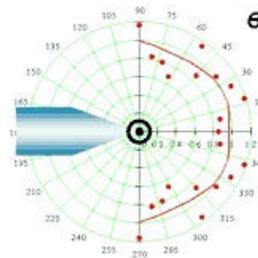


Abbildung 53: Schallfeld der Transversalwellenprüfköpfe TD 20 mit Polarisation in senkrecht zur Zeichenebene, Messung an der BAM, Veröffentlichung bei [ACSYS, 2005].

6.2.3 Messdatenaufnahme und Verarbeitung

Die vom Empfangskopf empfangenen Signale werden von einem Vorverstärker verstärkt und einem Messrechner (PC) mit integrierter ADU-Karte (PCI-Karte von *National Instruments* NI 6071 E64/SE) weiter verarbeitet und am Bildschirm dargestellt (Abbildung 39). Die Benutzeroberfläche und die Datenerfassungskarte werden mit dem Programm LabVIEW angesteuert und es ist möglich, die Empfindlichkeit der Messung, die Messpunkte pro Sekunde, die Wiederholrate für die Mittelwertbildung, den Dateinamen und den Speicherpfad einzugeben.

6.2.4 Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit wird über die gemessene Laufzeit und die Bauteilabmessungen bestimmt.

Zur Bestimmung der Laufzeit wird das Maximum der Wellengruppe betrachtet, die mit der Hilberttransformation gleichgerichtet und mit einer Einhüllenden geglättet wurde.

Mit dem Triggersignal wird die zeitliche Null des Experiments festgelegt. Alle entscheidenden Zeiten werden an Hand des folgenden Beispiels erklärt. Das in Abbildung 62 gezeigte aufgenommene Signal setzt sich aus mehreren Zeiten zusammen:

- Zeit zwischen Triggerimpuls und Maximum des Sendesignals
- Vorlaufzeit der Prüfköpfe (Zeit bis die Prüfköpfe schwingen und Schallsignal senden, G 0,2 GC: 2 μ s, TD20: 15 μ s)

Mit der Pre-Triggerung wird das gemessene Signal mit einer Zeit addiert, d. h. verschoben, um auf der Anzeige besser sichtbar zu sein und um das Rauschen vor dem Signal zu überprüfen.

Beispielsweise wird bei der digitalen Laufzeitmessung die Zeit zwischen dem Triggersignal und dem Schwellwert gemessen.

Um alle Einflüsse auszuschließen hat sich bewährt, den Sendekopf und den Empfangskopf ohne Verstärkung direkt aneinander zu koppeln. Diese, auf dem Bildschirm abgebildete Zeit ist die Summe aller bereits beschriebenen Zeiten und wird von den empfangenen Messsignalen subtrahiert.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Schalllaufzeit ist, wenn zusätzlich zum direkten Echo noch Vielfachechos empfangen werden (Abbildung 54). Ist dies der Fall, kann die Laufzeit, wie bei Messungen an Stahl üblich, sehr exakt zwischen dem ersten und dem zweiten Echo bestimmt werden.

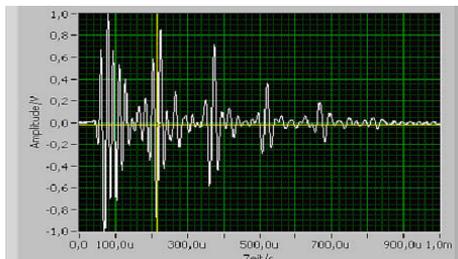


Abbildung 54: Vielfachecho einer Messung an einem Fichtenkantholz ($d = 10$ cm) mit Transversalwellenprüfköpfen TD 20 ($f = 55$ kHz) mit Polarisierung parallel zur Faserrichtung, Abstand der Echos 140 μ s, damit $v = 1,43$ km/s

6.3 Versuchskörper

Die Messungen wurden sowohl an ungeschädigten wie auch an geschädigten Versuchskörpern. Beispielhaft ist hier der Probekörper R (Referenzkörper) aus Kiefernholz (Abbildung 55) und der Probekörper P2 (Abbildung 56), ein ursprünglich ungeschädigter Probekörper mit künstlich eingebrachten Fehlstellen dargestellt. Eine Auflistung der Versuchskörper kann dem Anhang A.2.2 entnommen werden. Dabei wird in Probekörper, ausgebauten Bauteilen und im Bauwerk belassene Bauteile unterschieden.

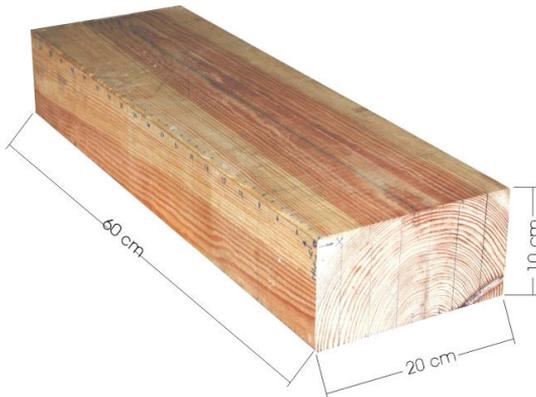


Abbildung 55: Referenzprobekörper R aus Kiefer (60 cm x 20 cm x 10 cm) aus dem halben Kern geschnitten; hoher, nahezu rissfreier Kernholzanteil

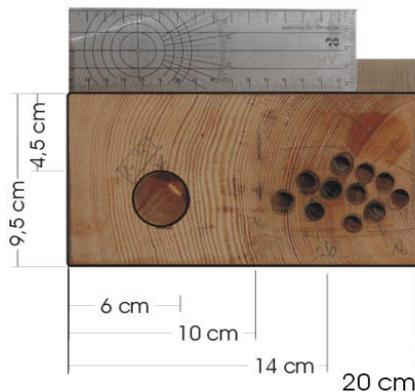


Abbildung 56: Probekörper P2 aus Kiefer (36 cm x 20 cm x 9,5 cm) aus dem halben Kern geschnitten; hoher, nahezu rissfreier Kernholzanteil

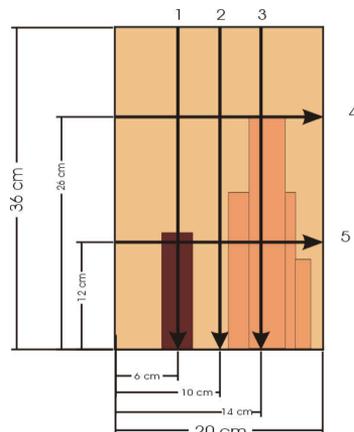


Abbildung 57: Schematische Draufsicht des Kiefernholzkörpers P2 mit Verlauf der Messlinien 1-5 und eingebrachten Schäden (Bohrlöcher).

Nach den Messungen an ungeschädigten, rissfreien Probekörpern mit eingebrachten Hohlstellen wurden Bauteile aus historischem Bestand beschafft (Kapitel A.5.1). Diese enthielten meist Schäden durch Fäulnis, welche von mindestens einer Seite nicht sichtbar sind. Ein Teil des ausgebauten Bauteils war ungeschädigt, um einen besseren Vergleich zwischen dem gesunden und dem geschädigten Bereich zu ermöglichen.

Im Zuge der Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Aicher der Materialprüfanstalt in Stuttgart wurde für die zerstörungsfreien Ultraschallechomessungen an der BAM ein Probekörper ausgeliehen.

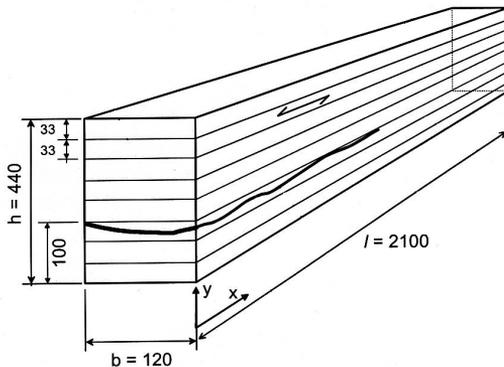


Abbildung 58: Brettchichtholz binder (BSH) der Materialprüfanstalt (MPA) Stuttgart [AICHER, 2002]

Die Auflistung der verwendeten Probekörper mit Herkunftsangabe kann Anhang A.2.2 entnommen werden.

6.4 Prüfkörperoberfläche und Ankopplung der Schallköpfe

Prüfkörperoberfläche

Die Beschaffenheit der Probekörperoberfläche ist für die Ankopplung der Prüfköpfe von großer Bedeutung, da eine erfolgreiche Ultraschallmessung auch von der Ankopplung abhängt. Die Probekörperoberflächen können grob in folgende drei Oberflächenbeschaffenheiten unterteilt werden:

- glatt, geschliffen
- sägerau
- uneben, grob behauen oder aufgefasert

Welche Art der Koppelmittel bei welcher Oberfläche sinnvoll ist, wird im nun folgenden Kapitel beschrieben.

Ankopplung der Schallköpfe

Neben den Punktkontaktprüfköpfen werden auch planare, zylindrische Prüfköpfe angewendet, die Koppelmittel zur Ankopplung am Bauteil erfordern. Diese Koppelmittel sollen den Schall gut in den Probekörper leiten aber auch nach der Messung möglichst gut und rückstandsfrei entfernbar sein.

Allgemein absorbieren poröse Werkstoffe die Koppelmittel gut, was neben den optischen Beeinträchtigungen auch zu praktischen Nachteilen führen kann. So gibt es Schwierigkeiten bei einer Messungen mit Impulsthermographie zur Hohlstellenortung an Betonprobekörpern nach einer vorherigen Ultraschall-Untersuchung mit dem Koppelmittel Glycerin

[RÖLLIG, 2004, mündliche Mitteilung]. Auch an Holz ist z. B. bei kunsthistorisch wertvollen Probekörpern oder Baumaterialien, welche zum weiteren Verbau bestimmt sind, eine solche nachhaltige Verunreinigung der Messoberfläche nicht tragbar. Zudem ist ein Aufbringen von Anstrichen an den eingefetteten Oberflächen meist nicht mehr möglich. Dennoch ist ein Messen mit den planaren Longitudinalwellenprüfköpfen G 0,2 GC ohne Koppelmittel nicht möglich. So wurden einige Versuche mit dem Ziel durchgeführt, andere Koppelmittel mit ähnlicher Schallübertragung zu finden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 3 dargestellt. Hier werden die verschiedenen Probekörperoberflächen mit den erforderlichen Koppelmitteln für planare Prüfköpfe und eine mögliche Anwendung der Punktkontaktprüfköpfe aufgeführt.

Tabelle 3: Ergebnis der Untersuchungen zu den möglichen Koppelmitteln in Abhängigkeit von der Holzoberfläche und Anwendbarkeit der Punktkontaktprüfköpfe

Holzoberfläche	Zylinderprüfköpfe mit Koppelmittel	Punktkontaktprüfköpfe (ohne Koppelmittel)
Glatt, geschliffen	Ultraschall-Gel, Kinderspielzeug „Slimi“, Vaseline, Silikonkappen	Ohne Koppelmittel sehr gute Ergebnisse
Sägerau	Vaseline, Plastiline	Ohne Koppelmittel gute Ergebnisse
Uneben, geschädigt, zerstört, verfault	Nur nach Entfernen der losen und verfaulten Teile Ankopplung mit Vaseline	Leicht uneben: gut, direkte Ankopplung der Prüfköpfe immer erforderlich

Grundsätzlich macht eine glatte Oberfläche schnelles Messen mit Ultraschall-Gel oder Punktkontakt möglich. Darum sollte immer geprüft werden, ob ein Anschleifen des Probekörpers zulässig ist und vielleicht im Rahmen der Umbaumaßnahmen schon bereits geplant ist. Sägeraue Oberflächen können schnell mit Punktkontakt oder Vaseline, etwas zeitaufwendiger mit Plastiline als Koppelmittel untersucht werden.

Ist die Probekörperoberfläche sehr uneben oder geschädigt müssen die lockeren, zersetzten und vermüllten Bestandteile entfernt werden, andernfalls kann kein Schall in den Probekörper eingebracht werden und ein Messen ist unmöglich.

Versuche mit Kunststoffolie oder dünner Gummifolie zwischen dem Probekörper und dem Zylinderprüfkopf mit Vaseline ergaben sehr schlechte Kopeleigenschaften, da kleine Luftbläschen zwischen der Folie und dem Probekörper verbleiben. In den Versuchen im Rahmen der Arbeit wird bei den Zylinderschalköpfen, wenn möglich, Ultraschall-Gel mit und ohne Silikonkappen auf den Prüfköpfen verwendet.

6.5 Ausbreitungsverhalten von niederfrequenten Longitudinal- und Transversalwellen in Holz

6.5.1 Tote Zone der Prüfköpfe durch Oberflächenwellen

Bei Ultraschallecho-Messungen befinden sich verfahrensbedingt Sender und Empfänger auf einer Bauteilseite. So kommt es, dass sich ein Teil der Schallwellen nicht im Inneren des Bauteils, sondern an der Oberfläche ausbreiten, und vom Empfänger vor den Echosignalen aus dem Bauteil empfangen werden.

Besonders Signale von oberflächennahen Reflektoren können so von Oberflächenwellen überlagert werden. Folgend eine Abschätzung für Oberflächenwellen für den im Rahmen der Arbeit häufig eingesetzten S/E Prüfkopf des Gerätes A1220.

Die Prüfkopfabstände und damit Strecken für Oberflächenwellen liegen zwischen dem kürzesten Abstand zwischen den örtlich benachbarten Sende- und Empfangsköpfen (2 cm) und der Diagonale des Prüfkopfs (12 cm). Ein rechnerisch besonders häufig auftretender Abstand ist 6 cm (Abbildung 59), was bedeutet, dass hier das Maximum der Oberflächenwellen zu erwarten ist.

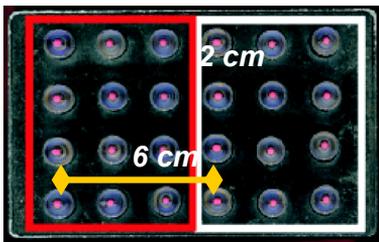


Abbildung 59: Untersicht S/E-Prüfkopf A1220, Abstand zwischen den einzelnen Prüfköpfen 2 cm, häufigster Abstand zwischen Senderreihe und Empfängerreihe

Um die Oberflächenwellengeschwindigkeit zu bestimmen wurden mit Punktkontaktprüfköpfen TD20 am Probekörper R die Laufzeit des Wellengruppenmaximums mit zunehmendem Abstand gemessen (Abbildung 60).

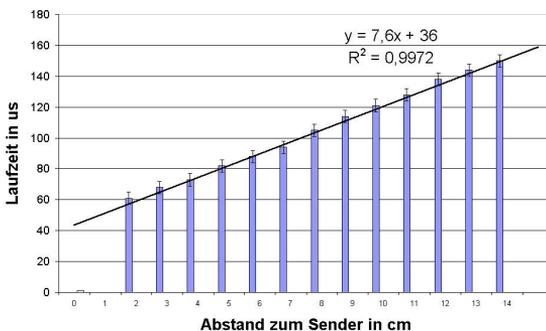


Abbildung 60: Laufzeit der ersten Wellengruppe in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Transversalwellenprüfköpfe TD 20

Aus dem Prüfkopfabstand ergibt sich $v = 1320 \frac{m}{s}$. Zur Überprüfung wurde die Oberflächenwellengeschwindigkeit aus v_T und μ bestimmt. Mit der Annahme von

$v_T = 1430 \frac{m}{s}$ und $\mu = 0,3$ gemäß Kapitel 5.1 folgt damit

$v_O = 0,9355 \cdot v_T = 0,9355 \cdot 1430 \frac{m}{s} = 1340 \frac{m}{s}$. Damit ist nachgewiesen, dass es sich hier um die Oberflächenwellengeschwindigkeit handelt.

Mit dem Weg und der Geschwindigkeit der Oberflächenwelle ergibt dies eine Laufzeit von $88 \mu s$, und bedeutet, dass Signale mit Laufzeiten unter $88 \mu s$ von Oberflächenwellen im Prinzip überlagert werden. Bei schwachen Signalen vom Rückwandecho kann dann eine Unterscheidung zwischen Oberflächenwelle und Echosignal schwierig sein. Diese Laufzeit kann einem Laufweg einer Transversalwelle in Holz von 13 cm zugeordnet werden. Unter der Annahme, dass der Schall in der Mitte des Prüfkopffarrays gesendet und empfangen wird, entspricht dies nach Gleichung 8 einer Tiefe von 6 cm.

$$T = 0,5 \cdot \sqrt{x_1^2 - m^2}$$

Gleichung 8: Tiefe der toten Zone des Prüfkopfs durch Oberflächenwellen

mit

T: Tiefe

x_1 : Laufweg Schall

m: Abstand zwischen der Prüfkopfmitte

Der häufigste Abstand zwischen den einzelnen Sendeköpfen und Empfangsköpfen beträgt 6 cm, was bedeutet, dass durch die intensiven Oberflächenwellen mit einer Laufzeit von $45 \mu s$ eine Ortung eines Reflektors in einer Tiefe von 1,2 cm nicht möglich ist.

6.5.2 Einfluss der Prüfkopfanzordnung relativ zum Faserwinkel

Wie schon mehrfach beschrieben, ist Holz anisotrop aufgebaut. Dies bedeutet auch, dass der Einfluss des Winkels zwischen der Verbindungslinie der Prüfköpfe und der Faserrichtung beachtet werden muss. Auf diese Weise ist es möglich, viele, nicht deutbare, empfangene Signale leichter zu erklären und einige Prüfkopfanzordnungen, die nur Oberflächenwellen verursachen, zu vermeiden. In Abbildung 61 sind die beiden unterschiedlichen Anordnungen der Prüfköpfe relativ zur Faserrichtung dargestellt.

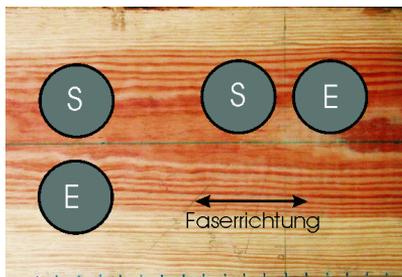


Abbildung 61: links: Anordnung der Prüfköpfe mit Verbindungslinie zwischen den Prüfköpfen senkrecht zur Faser (90°); rechts Verbindungslinie zwischen den Prüfköpfen parallel zur Faser (0°)

Longitudinalwellenprüfköpfe

Die Prüfköpfe werden wie in Abbildung 61 dargestellt relativ zur Faser mit einer Verbindungslinie senkrecht oder parallel zur Faser angekoppelt werden.

Die A-Bilder einer Ankopplung mit einem Schallweg senkrecht zur Faser (Abbildung 61 links) und parallel zur Faser (Abbildung 61 rechts) unterscheiden sich stark. Neben dem klaren Rückwandecho bei einer Anordnung und somit Schallweg senkrecht zur Faser (Abbildung 62) kommt es bei einer Ankopplung parallel zur Faser zu zusätzlich empfangenen Signalen mit kürzerer Laufzeit (Abbildung 63).

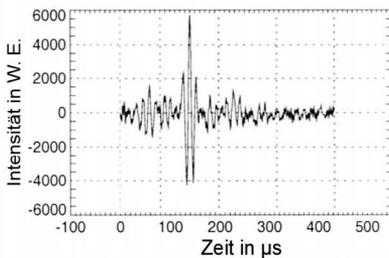


Abbildung 62: A-Bild mit Rückwandecho bei S/E-Betrieb (Longitudinalwellen, $f = 100$ kHz), Winkel der Verbindungsachse der Prüfköpfe senkrecht zur Faserrichtung (90°), Prüfkopfanzordnung nach Abbildung 61 links

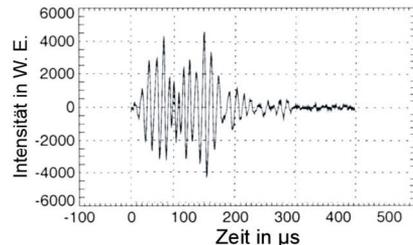


Abbildung 63: A-Bild mit Rückwandecho bei S/E-Betrieb (Longitudinalwellen, $f = 100$ kHz), Winkel der Verbindungsachse der Prüfköpfe parallel zur Faserrichtung (0°), Prüfkopfanzordnung nach Abbildung 61 rechts

Frühere Überlegungen [HASENSTAB, 2002(2)] ergaben, dass es sich hierbei um Oberflächenwellen handelt, die sich in Faserrichtung sehr gut ausbreiten.

Senkrecht zur Faser kommt es durch den häufigen Wechsel zwischen Früh- und Spätholz zu einer Dämpfung der Oberflächenwellen.

In der folgenden Abbildung 64 ist das empfangene Signal, je nach Schallweg relativ zur Faser, als pseudo B-Bild dargestellt.

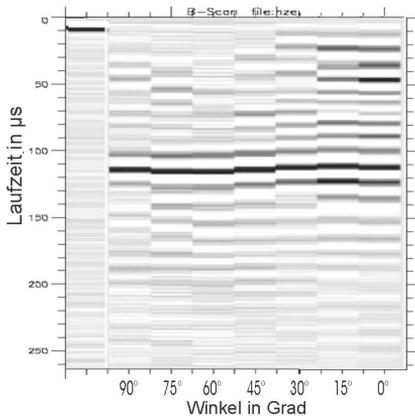


Abbildung 64: Darstellung des Rückwandechos (als pseudo B-Bild) mit unterschiedlichen Prüfkopfpositionen bezogen auf die Faser mit den Longitudinalwellenprüfköpfen G 0,2 GC (100 kHz). Die Spalte bei 90° entspricht Position in Abbildung 65 links, d. h. A-Bild in Abbildung 62, die Spalte entspricht bei 0° entspricht Abbildung 65 rechts, d. h. A-Bild in Abbildung 63.

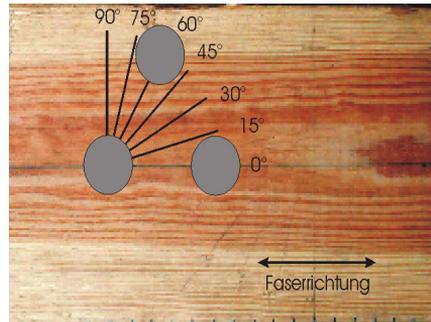


Abbildung 65: Verschiedene Positionen der Prüfköpfe relativ zur Faser mit links einem Winkel zwischen der Verbindungsachse der Prüfköpfe und der Faserrichtung von 90°, rechts mit einer Verbindungsline der Prüfköpfe parallel zur Faser

Transversalwellenprüfköpfe

Wie bereits beschrieben ist die Schwingungsrichtung der Transversalwellenprüfköpfe parallel zur Oberfläche. Deshalb muss neben der Ankopplung auch die Schwingungsrichtung der Prüfköpfe relativ zur Faserrichtung beachtet werden. Diese Schwingungsrichtung der Prüfköpfe relativ zur Faser, kann in eine Schwingungsrichtung parallel zur Faser (Abbildung 66) und senkrecht zur Faser (Abbildung 67) unterschieden werden.

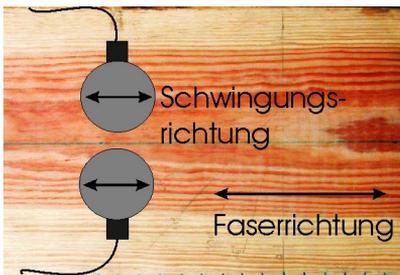


Abbildung 66: Polarisation der Transversalwellen parallel zur Faser ergibt vergleichsweise geringen Anteil an Oberflächenwellen (A-Bild in Abbildung 68), in den folgenden Versuchen immer verwendet



Abbildung 67: Polarisation der Transversalwellen senkrecht zur Faser ergibt sehr intensive Oberflächenwellen (A-Bild in Abbildung 69) für die Anwendung bei Ultraschallechomessungen nicht sinnvoll

In Abbildung 68 ist ein typisches A-Bild bei einer Schwingung parallel zur Faser dargestellt, in Abbildung 69 bei gleicher Intensität ein typisches A-Bild mit Schwingung senkrecht zur Faser, was zur Auswertung ungeeignet ist. Dieses Resultat war sowohl mit Einzelprüfköpfen als auch der S/E-Einheit A1220 zu erzielen.

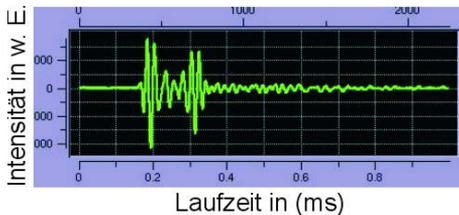


Abbildung 68: A-Bild einer Echomessung mit Polarisation der Schwingungsrichtung parallel zur Faser mit Oberflächenwelle und Rückwandecho (TD20 $f = 55$ kHz, RC2-Puls)

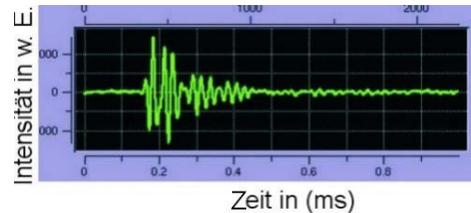


Abbildung 69: A-Bild einer Echomessung mit Polarisation der Schwingungsrichtung senkrecht zur Faser mit Oberflächenwelle und Rückwandecho (TD20 $f = 55$ kHz, RC2-Puls)

Wenn die Anregungsrichtung der Transversalwellen in Richtung der Fasern des Probekörpers ist (0°), kommt es zu einem störungsarmen Rückwandecho. Wird der Winkel stufenweise auf 90° erhöht, was einer Anregung senkrecht zur Faser entspricht, ändert sich das gemessene Signal. Wie aus Abbildung 70 ersichtlich, kommt es zu einer völligen Abnahme des Rückwandsignals und zu ausgeprägten Impulsen mit sehr kurzer Laufzeit. Dies liegt zum einen daran, dass bei einer Polarisation der Schallwelle senkrecht zur Faser die sehr langsamen Scherwellen v_{44} angeregt werden, zum anderen könnte die Reflexion der Schallwellen an den Jahrringen zu den intensiven Signalen kurzer Laufzeit führen.

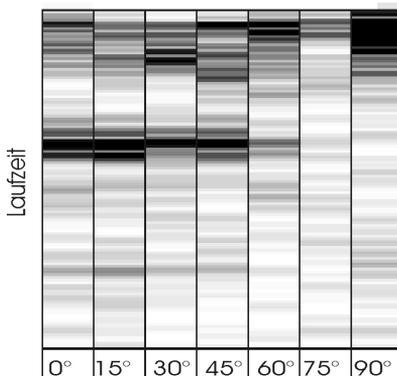


Abbildung 70: Abhängigkeit des Rückwandechos vom Polarisationswinkel der Transversalwelle bezogen auf die Faser

Eine Anordnung der Transversalwellenprüfköpfe nach Abbildung 71 zweites Prüfkopfpärchen von rechts, d. h. beide Prüfköpfe werden auf der gleichen Faser mit der Schwingungsrichtung parallel zur Faser angekoppelt, führt beispielsweise am Probekörper R zu sehr ausgeprägten Oberflächenwellen, die eine Deutung des Rückwandechos bei Zweikopftechnik sehr erschweren. Hier kann nur mit der Technik der Laufzeitkorrigierten Überlagerung (Kapitel 6.6) ein deutliches Rückwandecho erzielt werden. Aus diesen Versuchen ergab sich eine Prüfkopfanzordnung mit Verbindungslinie zwischen den

Prüfköpfen senkrecht zur Faser (Abbildung 61 links) und eine Polarisierungsrichtung der Transversalwellen parallel zur Faser (Abbildung 66).

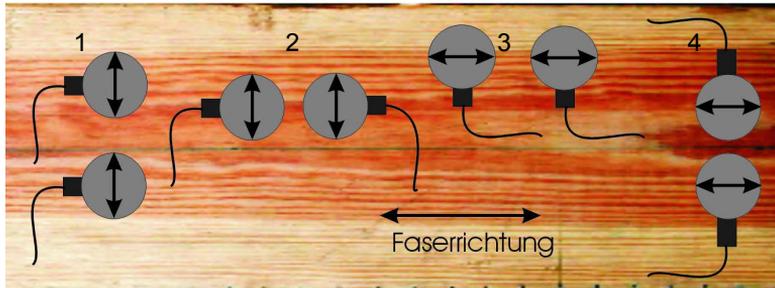


Abbildung 71: Abbildung der möglichen Anstellpositionen und Polarisationsrichtungen der Transversalwelle relativ zur Faser. Optimale Position rechts (Nr. 4) mit oberflächenwellenarmer Ankopplung und Polarisationsrichtung der Transversalwellen parallel zur Faser.

6.5.3 Vergleich der Messergebnisse unterschiedlicher Anregungsimpulse, Prüffrequenzen und Prüfköpfe

Rechtecksender

Eine Anregung der Transversalwellenprüfköpfe TD 20 mit dem RC2-Puls (Kapitel 6.2.1) ergab für eine Ankopplung mit der Polarisationsrichtung parallel zur Faser das A-Bild in Abbildung 68, für eine Ankopplung rechtwinklig dazu Abbildung 69. Mit dem Rechtecksender angeregt wurde für eine Ankopplung mit Schwingungsrichtung parallel zur Faser Abbildung 72 und für die Schwingungsrichtung der Transversalwellen senkrecht zur Faser Abbildung 73 erzielt.

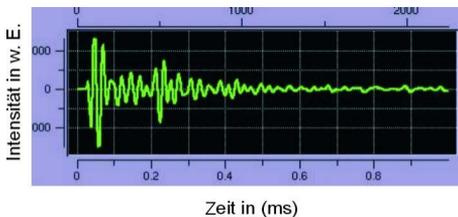


Abbildung 72: Rechtecksender mit 55 kHz, Transversalwellen TD 20, Schwingungsrichtung der Transversalwellen parallel zur Faser

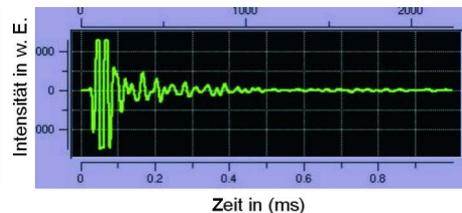


Abbildung 73: Rechtecksender mit 55 kHz, Transversalwellen TD 20, Schwingungsrichtung der Transversalwellen senkrecht zur Faser

Ein Vergleich mehrerer Messungen ergab, dass bei kleinen Bauteilabmessungen (10 – 15 cm) mit beiden Pulsen gute Ergebnisse erzielt wurden, wobei das empfangene Signal bei dem RC2-Puls eine geringere Halbwertsbreite besaß.

Messungen an großen Bauteilen wie BSH-Bindern, ergaben bei der gleichen Frequenz von 55 kHz mit dem RC2-Puls nur Echos an den einzelnen Brettern, wobei mit dem Rechteckimpuls oder der niedrigeren Frequenz von 33 kHz deutlich die Bauteilrückwand detektiert werden konnte (Kapitel 7.1.4).

Prüffrequenzen

Mit der Transversalwellen-Messeinheit A1220 wurden am ungeschädigten Probekörper R Messungen mit den Einstellungen 33 kHz, 55 kHz, 70 kHz, 100 kHz, 125 kHz, 170 kHz und 250 kHz durchgeführt. Dabei zeigte sich, wie nach der Theorie erwartet, dass der Empfangsimpuls mit Zunahme der Frequenz schärfer wird, dafür aber stärker geschwächt wird.

Messungen an dem Sparren REI02 (Abbildung 195) mit 33 kHz (Abbildung 196) und 55 kHz (Abbildung 197) und ausgewählter A-Bilder (Abbildung 198, Abbildung 199) zeigen, dass bei niedrigen Frequenzen ausgeprägte Oberflächenwellen und Signale von der Rückwand mit einer größeren Halbwertsbreite empfangen werden. Deshalb wird folgend immer, außer bei Bauteilen mit sehr großen Abmessungen ($b > 40$ cm), eine Frequenz von 55 kHz eingesetzt.

Mit den Longitudinalwellenprüfköpfen G 0,2 GC wurden am Probekörper R Echomessungen an der gleichen Position mit 20 kHz, 25 kHz, 30 kHz, 35 kHz, 40 kHz, 50 kHz, 75 kHz, 100 kHz, 110 kHz, 125 kHz und 150 kHz durchgeführt (Anhang 14). Mit zunehmenden Frequenzen wird das Rückwandsignal klarer, wobei ab 110 kHz durch die kleine Wellenlänge die Störungen durch Inhomogenitäten zunehmen.

Ein sehr klares Rückwandecho wird bei einer Frequenz von 100 kHz empfangen, was somit auch die künftige Impulsfrequenz für die Prüfköpfe G 0,2 GC wird. Zufälligerweise liegt auch für Untersuchungen an Beton die typische Frequenz bei 100 kHz.

6.5.4 Messunsicherheit und Fehlerbetrachtung

Anhand der gemessenen Schalllaufzeit an einem Messpunkt mit bekannten Bauteilabmessungen kann die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden. Mit dieser können dann empfangene Echos einer Tiefe zugeordnet werden.

Die Messunsicherheit der Ultraschallmessung wird von Einflüssen gerätetechnischer, verfahrenstechnischer und subjektiver Art beeinflusst [DGZFP, 1996].

Wenn diese Daten gemessen und ausgewertet werden, kommt es auch bei sorgfältigster Messung zu Fehlern verschiedener Natur. Diese Messfehler werden nach ihrer Art der Entstehung unterschieden [BRONSTEIN, 1997]:

Grobe Fehler

(Falsches Ablesen, Verwechslungen; erfordern immer eine Neumessung) Diese Fehler können durch einen Vergleich der umfangreichen ausgewerteten Messdaten fast ausgeschlossen werden.

Systematische Fehler

(falsche Kalibrierung) Die Kalibrierungsungenauigkeit der verwendeten Messgeräte liegt im Nanosekunden-Bereich und ist im Verhältnis zu den abgelesenen Werten unbedeutend.

Statistische oder zufällige, unvermeidbare Fehler

(zufällige Veränderungen der Messbedingungen, Schwankung der Schalllaufzeit, Ablesefehler) Durch die Inhomogenität des Holzes und durch eine unterschiedliche

Ankopplung kann es zu einer Schwankung der Schalllaufzeiten bei sonst gleichen Bedingungen kommen.

Da die Anstiegflanke des Echos zwar sehr steil, aber nicht senkrecht ist, hängt die Breite des Echos, und damit die Lage des Fußpunktes von der Echohöhe ab. Diese Fehlerquelle wird durch die Auswertung des Wellengruppenmaximums umgangen.

Für Einzelmessungen wird folgend eine Fehlerabschätzung der Schallgeschwindigkeit durchgeführt, die sich aus der Messungengenauigkeit bei den Bauteilabmessungen und den Schalllaufzeiten zusammensetzt.

Eine statistische Fehlerauswertung ist erst ab mindestens 10 Messungen sinnvoll. Da Einzelmessungen erfolgten, wird die Methode der Fehlerfortpflanzung verwendet.

Für die Messunsicherheit bei der Berechnung der Geschwindigkeiten addiert sich gemäß den Regeln der Fehlerfortpflanzung der relative Fehler wie folgt:

$$\delta v = \sqrt{(\delta s)^2 + (\delta t)^2} \quad \text{Gleichung 9: Fehlerfortpflanzung}$$

δv : Messunsicherheit der Geschwindigkeit

δs : Messunsicherheit bei den Bauteilabmessungen

δt : Ablesefehler und Geräteungenauigkeit bei der Vorlaufzeit

Messunsicherheit bei Bauteilabmessungen

Die Abmessungen können je nach Beschaffenheit nur begrenzt genau bestimmt werden. Da die Probekörperabmessungen aber nicht planparallel sind, wird ein Abmessungsfehler nach Tabelle 4 angenommen.

Tabelle 4: Messunsicherheit bei der Bestimmung der Bauteilabmessungen

Messort	Bauteiloberfläche	Bauteildicke in mm	Fehler in mm
Labor	glatt	50-350	2
Labor	uneben	ab 100	5
Bauwerk	glatt	ab 100	5
Bauwerk	uneben	ab 100	7
Bauwerk	grob bebeit	ab 100	10

Aus den Probekörpergrößen und Messbedingungen entsteht so beispielsweise für Messungen am Probekörper P2 mit einer Dicke von 95 mm ein Messfehler von

$\delta s = \frac{2 \text{ mm}}{95 \text{ mm}} \cdot 100 \% = 2,1 \%$. Dieser typische Fehler wird für die weiteren Rechnungen weiter angewendet.

Messunsicherheit bei Schalllaufzeiten

Je nach Versuchsaapparatur und Art der Schallwellen kommt es zu unterschiedlicher Messunsicherheit.

Für Einzelwerte wird im allgemeinen eine Fehlerabschätzung von $10 \mu\text{s}$ vorgenommen, die aber im Idealfall bei Einzelmessungen geringer sein kann und im folgenden genauer bestimmt wird.

Longitudinalwellen

Der Fehler beim Ablesen der Schalllaufzeiten aus den A-Bildern beträgt bei Longitudinalwellen etwa $5 \mu\text{s}$. Damit ergibt sich nach Gleichung 9 mit $\delta s = 2\%$ (Bezogen auf

10 cm) und $\delta t = \frac{5 \mu\text{s}}{140 \mu\text{s}} \cdot 100\% = 3,9\%$ ein Fehler der Longitudinalwellen

$$\delta v = \sqrt{(\delta s)^2 + (\delta t)^2} = \sqrt{2\%^2 + 3,9\%^2} = 4,4\% \approx 4\%$$

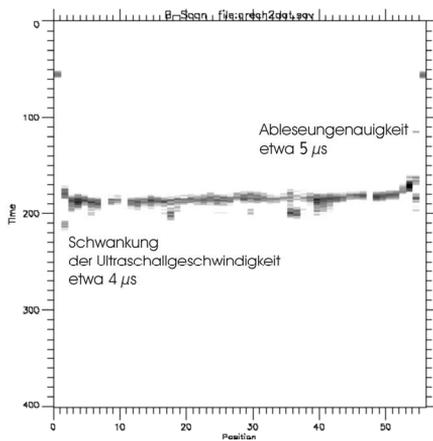


Abbildung 74: Fehler durch Ablesegenauigkeit und Schwankung der Ultraschallgeschwindigkeit bei Longitudinalwellen mit 100 kHz

Transversalwellen mit Entwicklungsapparatur

Anhand des B-Bildes und zwei A-Bildern von einer Echomesung (Abbildung 116) kann die Messgenauigkeit der Entwicklungsapparatur gut gezeigt werden. Im A-Bild 1 kann die Laufzeit sehr genau, im A-Bild 2 durch die flache Spitze nur auf etwa $5 \mu\text{s}$ genau abgelesen werden. Damit ergibt sich nach Gleichung 9 mit $\delta t = \frac{5 \mu\text{s}}{175 \mu\text{s}} \cdot 100\% = 2,9\%$ und $\delta s = 2\%$ ein

Fehler von $\delta v = \sqrt{(\delta s)^2 + (\delta t)^2} = \sqrt{2\%^2 + 2,9\%^2} = 3,52\% \approx 4\%$.

Transversalwellen mit dem Handgerät A1220

Da für die empfangenen Messwerte beim Handgerät A1220 nur die begrenzte Anzahl von 127 Zahlenwerten gespeichert werden kann, entsteht bei $790 \mu\text{s}$ zwischen jedem Messpunkt ein Abstand von $6,25 \mu\text{s}$. Damit ergibt sich nach Gleichung 9 mit der schon bestimmten

$\delta s = 2\%$ und $\delta t = \frac{2 \mu\text{s}}{790 \mu\text{s}} \cdot 6,25 \cdot 100\% \approx 2\%$ ein Fehler von

$$\delta v = \sqrt{(\delta s)^2 + (\delta t)^2} = \sqrt{2\%^2 + 2\%^2} = 2,8\% \approx 3\%$$

Fehler bei vergleichenden Messungen

Messungen an planparallelen Platten haben zur Folge, dass es zu Schwankungen der Schalllaufzeiten durch Inhomogenitäten im Holz und einer unterschiedlichen Ankopplung kommt. Bei Longitudinalwellen ergibt dies einen Fehler von $\delta t = \frac{4 \mu\text{s}}{140 \mu\text{s}} \cdot 100\% = 2,9\%$ und bei

Transversalwellen von etwa $\delta t = \frac{10 \mu\text{s}}{175 \mu\text{s}} \cdot 100\% = 5,7\%$. Dies bedeutet, der Fehler bei vergleichenden Messungen an einem Bauteil ist für Longitudinalwellen 5 % und bei Transversalwellen 7 %.

Nutzsignal-Störsignal

Das Ziel der Ultraschallmessungen ist es, ein Verhältnis von Nutzsignal zu Störsignal von 2 zu 1 oder 6 dB zu erreichen. Erfüllt ein Echosignal diese Bedingung, wird es im Text als gutes oder klares Echo bezeichnet. Ist das Verhältnis 4 zu 1 oder 12 dB, dann handelt es sich um ein sehr deutliches oder sehr klares Echo.

Bei großen Bauteildicken ist häufig eine hohe Verstärkung erforderlich, was auch zu intensiven Oberflächensignalen und Störsignalen führt. Aus diesem Grund wird innerhalb der dreifachen Halbwertsbreite das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Störsignal untersucht.

In Abbildung 75 hat das Rückwandsignal eine Intensität von etwa 190 w. E., das Störsignal im Bereich der Halbwertsbreite eine Intensität von 25 w. E., womit das Verhältnis Nutzsignal zu Störsignal von 7,6 beträgt. Das Echosignal am Riss ist zeitlich gesehen breiter und hat somit eine größere zugehörige Halbwertsbreite. In diesem Fall ist das Verhältnis von Nutzsignal zu Störsignal mit 125 w. E. zu 60 w. E. mit 2,1 noch knapp über der Grenze von 6 dB. Hier sollte im zugehörigen B-Bild genau beachtet werden, welche Tendenz das Echosignal aufweist.

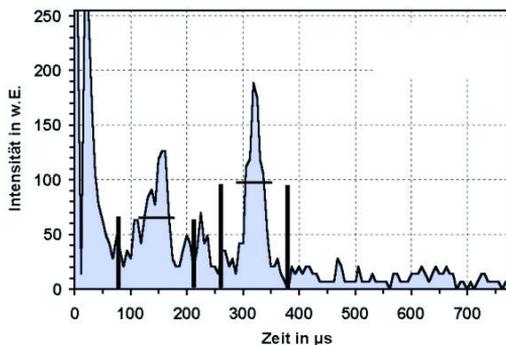


Abbildung 75: A-Bild mit Echo an der Bauteilrückwand und Echo an einem Schwindriss (planparallel zur Oberfläche). Als schwarze Linien eingezeichnet, die dreifache Halbwertsbreite der Signale, um den zu betrachtenden Bereich zu definieren.

6.5.5 Gemessene Schallgeschwindigkeiten und Vergleich mit der Literatur

In Kapitel 5.3.1 wird die Anisotropie, d. h. die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten in den verschiedenen anatomischen Richtungen, ausführlich behandelt. Im folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse der Untersuchungen mit Literaturwerten verglichen werden. Ein besonderes Augenmerk soll hier auf die Untersuchungen mit niederfrequenten (unter 200 kHz) Transversalwellen an Holz geworfen werden, denn alle aus der Literatur bekannten Untersuchungen wurden mit hochfrequenten Prüfköpfen durchgeführt.

Die Geschwindigkeit wurde über die gemessene Laufzeit und die Bauteilabmessungen bestimmt (Kapitel 6.2.4).

Schallgeschwindigkeiten der Longitudinalwellen in Holz

Eigene Messungen am Probekörper R (Abbildung 55) ergaben die in Abbildung 76 dargestellten Geschwindigkeiten. Wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, nehmen die Schallgeschwindigkeiten von tangentialer zu radialer und zu axialer Richtung zu [NIEMZ, 1998, AICHER, 2001].

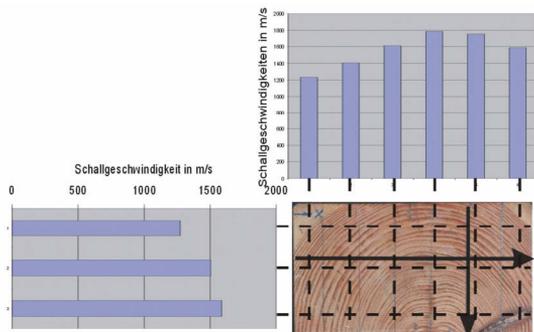
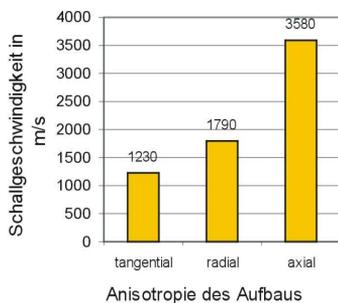


Abbildung 76: Unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten der Longitudinalwellen an Kiefernholzkörper R in Abhängigkeit von der anatomischen Richtung (100 kHz, G0,2 GC)

Abbildung 77: Stirnansicht R mit Schallgeschwindigkeiten der Longitudinalwellen entlang der gepunkteten Linie, am Rand mit tangential/radialem und in der Mitte mit rein radialem Anteil (100 kHz, G0,2 GC)

Praktisch bedeutet dies, dass sich bei unterschiedlichen Messpositionen am Balken, bezogen auf die Jahrringlage, unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten ergeben (Abbildung 77). Dieser Einfluss muss bei der hier beschriebenen vergleichenden Messung beachtet werden, kann aber bei Messungen der Ausbreitung entlang der Faser (Abbildung 57, Messlinie 1) vernachlässigt werden.

Schallgeschwindigkeiten der Transversalwellen in Holz

Messungen mit niederfrequenten Transversalwellen am Probekörper R sind in Abbildung 79 dargestellt. Diese Ergebnisse sind die ersten umfangreichen Untersuchungen mit niederfrequenten Transversalwellen und unterscheiden sich deutlich von den Ergebnissen mit Longitudinalwellen.

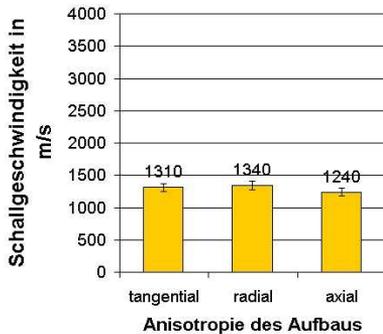


Abbildung 78: Ähnliche Schallgeschwindigkeiten der Transversalwellen an Kiefernholzkörper R in Abhängigkeit von der anatomischen Richtung (55 kHz, TD 20)

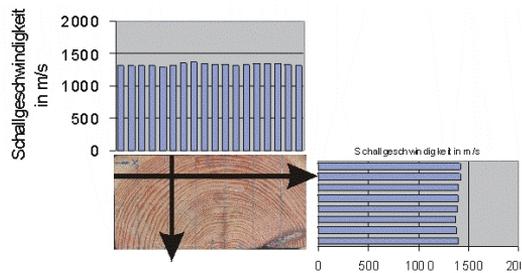


Abbildung 79: Stirnansicht R mit Schallgeschwindigkeiten der Transversalwellen an verschiedenen Punkten (55 kHz, TD 20)

Vergleich der gemessenen Schallgeschwindigkeiten mit Literaturwerten

Bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten stellte sich heraus, dass unabhängig von der Wellenart, die Schallgeschwindigkeit im Kernholz um 8 – 12 % niedriger ist als im Splintholz.

Zur genauen Definition der Schallgeschwindigkeit in Bezug auf die Faserrichtung im Holz, müssen sowohl die drei anatomischen Richtungen (axial = longitudinal (L), radial (R), tangential (T)) sowie die Polarisationsrichtung der Schallwellen in Bezug auf die Faser beachtet werden. Diese beiden Richtungen spiegeln sich in zwei Koeffizienten bei der Schallgeschwindigkeit wieder. Dabei bedeutet der erste Koeffizient die Ausbreitungsrichtung der Schallwelle, der zweite die Polarisation der Schallwelle in Bezug auf die Faser.

Aus dem theoretischen Zusammenhang der beiden Werte in der Mechanik lassen sich die Koeffizienten gegeneinander vertauschen [BUCUR, 2005 , SCHUBERT, 2005 (2)]:

$$v_{TR} \triangleq v_{RT}$$

$$v_{LR} \triangleq v_{RL}$$

$$v_{LT} \triangleq v_{TL}$$

Durch die Inhomogenitäten und Schwankungen im Aufbau des Holzes ist die Theorie nicht ganz erfüllt und es kommt zu einer Abweichung zwischen jeweils beiden Werten, die unter 10 % liegt. In der Literatur werden daher oft beide, theoretisch gleichen Werte zusammengefasst [BUCUR, 2002]. So wird die Geschwindigkeit v_{44} aus den Werten von v_{TR} und v_{RT} abgeleitet.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse und der unterschiedlichen Bezeichnungen in der Literatur werden folgende Bezeichnungen festgelegt:

$$v_{11} \triangleq v_{LL} \quad v_{22} \triangleq v_{RR} \quad v_{33} \triangleq v_{TT}$$

$$v_{44} \triangleq v_{TR} \quad (\text{abgeleitet aus } v_{TR} \text{ und } v_{RT})$$

$$V_{55} \triangleq V_{LT} \quad (\text{abgeleitet aus } v_{LT} \text{ und } v_{TL})$$

$$V_{66} \triangleq V_{LR} \quad (\text{abgeleitet aus } v_{LR} \text{ und } v_{RL})$$

Meist sind in der Literatur Angaben über Longitudinalwellengeschwindigkeiten zu finden. Umfangreiche Untersuchungen mit Transversalwellen zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten an kleinen Bauteilen mit Abmessungen weniger Zentimeter wurden von Bucur durchgeführt (Tabelle 5). Die verwendete Ultraschallfrequenz betrug etwa 500 kHz bis 1000 kHz.

Tabelle 5: Verschiedene Laub- und Nadelhölzer mit Schallgeschwindigkeiten [BUCUR, 2002]

Species	Density (kg/m ³)	Velocities (m/s)					
		V ₁₁	V ₂₂	V ₃₃	V ₄₄	V ₅₅	V ₆₆
Hardwoods							
Poplar	326	5074	2200	1210	642	1250	1536
Horse chestnut	510	4782	2311	1382	536	1166	1549
Tulip tree	574	5625	2047	1511	566	1272	1413
Oak	600	5071	2148	1538	683	1252	1546
European plane	620	5060	2178	1646	840	1234	1460
Common maple	623	4695	2148	1878	630	1148	1305
Beech	674	5074	2200	1560	960	1270	1510
Curly maple*	700	4350	2590	1914	812	1468	1744
Pernambuco	932	4935	2435	2034	1006	1280	1294
Softwoods							
Silver spruce*	352	5500	2225	1850	325	1386	1361
Spruce*	400	5600	2000	1600	298	1425	1374
Douglas fir	440	5500	2330	1990	560	1660	1662
Sitka spruce*	430	5550	2300	1500	350	1480	1500
Sitka spruce common	450	5200	2200	1500	450	1560	1630
Red spruce*	485	6000	2150	1600	330	1240	1320
Spruce common	485	5353	1580	1146	477	1230	1322
Pine	580	5000	2100	1200	600	1030	1050

Genauere Angaben über beide Polarisationsrichtungen und alle neun Geschwindigkeiten, die sich aus den drei Longitudinalwellengeschwindigkeiten und den sechs Transversalwellengeschwindigkeiten zusammensetzen, sind in der Literatur selten.

Im Rahmen der Untersuchungen an der BAM war es möglich, alle neun Schallgeschwindigkeiten an Bauteilen größerer Abmessungen zu bestimmen. Diese Ergebnisse werden nun mit Literaturwerten in Tabelle 6 verglichen. Die Abweichungen zwischen den verschiedenen Messergebnissen werden durch unterschiedliche verwendete Prüfköpfe, Messfrequenzen, Pulsformen, Probekörpergrößen und besonders durch die Abweichungen der Eigenschaften des Holzes bedingt. Beispielsweise unterscheidet sich die Kiefer aus Brandenburg sehr von anderen Kiefern [ROSNER, 2005].

In den beiden linken Spalten sind die Messwerte an Kiefer mit 500 kHz und 1000 kHz und in der mittleren Spalte Messwerte an Fichte zu sehen. Die Geschwindigkeiten aus den errechneten Slownesskurven für Fichte (Abbildung 33) sind in der zweiten Spalte von rechts zu sehen. In der ganz rechten Spalte sind die Ergebnisse der eigenen Messungen an der BAM aufgeführt.

Tabelle 6: Werte für die Schallgeschwindigkeiten für Kiefer und Fichte aus der Literatur und eigene niederfrequente Messungen mit Fehlerangabe (4 %)

	Kiefer f = 500 kHz [BUCUR, 1998]	Kiefer f = 1000 kHz [BUCUR, 1995]	Fichte f = 1000 kHz [BUCUR, 1995]	Aus Slowness- kurven für Fichte [BUCUR, 2002 (3)]	Kiefer (BAM) Longitudinal- welle f = 100 kHz Transversal- welle: f = 55 kHz	Unterschied zwischen theoretisch gleichen Werten
Longitudinal- wellengeschwi- n-digkeit						
v₁₁ = v_{LL} in m/s	5214	5000	5600	4170	3580 +/- 143	
v₂₂ = v_{RR} in m/s	2434	2100	2000	2000	1790 +/- 72	
v₃₃ = v_{TT} in m/s	2009	1200	1600	1666	1230 +/- 49	
Transversal- wellengeschwi- n-digkeit						
v₄₄ = v_{TR} in m/s	685	600	298	710	330 +/- 13	12 %
v_{RT}	650				370 +/- 15	(sehr geringe Signalhöhe)
v₅₅ = v_{LT} in m/s	1199	1030	1425	1250	1240 +/- 50	5 %
v_{TL}	1118				1310 +/- 52	
v₆₆ = v_{LR} in m/s	1326	1050	1374	1250	1320 +/- 53	2 %
v_{RL}	1355				1340 +/- 54	

Die oberen Geschwindigkeiten (v_{11} , v_{22} , v_{33}) wurden mit den Longitudinalwellenprüfköpfen G 0,2 GC mit 100 kHz und die übrigen Geschwindigkeiten mit den Transversalwelleprüfköpfen TD20 mit 55 kHz bestimmt.

Der Vergleich der mit Longitudinalwellen bestimmten Werte zeigt deutlich die Tendenz, dass in axialer Richtung die Schallgeschwindigkeit am größten ist, in radialer Richtung die Schallgeschwindigkeit etwa halb so groß ist und in tangentialer Richtung am geringsten ist.

Auffällig ist, dass alle drei Werte der Messungen an der BAM unter den vergleichbaren Schallgeschwindigkeiten liegen. Mehrere Ursachen können zu diesem Phänomen führen. So hat eine Zunahme der Jahrringbreite eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit zur Folge (Abbildung 36) und die Jahrringe sind hier mit 7 mm relativ breit. Zudem wurden die Messungen im Kernholz durchgeführt, was bedeutet, dass geringere Schallgeschwindigkeiten als im Splintholz gemessen werden [BARTLOMIEJ, 1977]. Auch die angewendeten niedrigen Frequenzen führen zu einer geringeren Schallgeschwindigkeit [NIEMZ, 1999].

Zudem ist es mit den Longitudinalwellenprüfköpfen G 0,2 GC mit 37 mm Wandlerdurchmesser nicht möglich, genau radial bzw. tangential zu messen. Der für die Bestimmung der tangentialen Schallgeschwindigkeit angenommene Schallweg beinhaltet noch radiale Anteile, was bedeutet, dass die reine tangentielle Geschwindigkeit etwas niedrigere Werte haben müsste.

Der Vergleich der Ergebnisse mit Transversalwellen zeigt, dass die Werte von v_{55} und v_{66} etwa gleich sind und v_{44} sehr viel kleinere Werte besitzt. Die Messwerte für Kiefer stimmen für v_{66} und v_{55} sehr gut überein und ergeben zudem, dass v_{66} etwas größer als v_{55} ist. Größere Abweichungen sind bei dem Vergleich der Werte für v_{44} zu erkennen, wobei hier ein Blick in Tabelle 5 zeigt, dass die Werte z. B. bei unterschiedlichen Fichten stark schwanken und hier die allgemeine Bezeichnung „Kiefer“ vielleicht zu ungenau ist. Der Vergleich mit v_{44} von Fichte zeigt, dass auch hier geringere Werte für v_{44} gemessen werden.

6.6 Laufzeitkorrigierte Überlagerung und SAFT

Zur Dickenbestimmung an Beton wird im Ultraschallecho-Verfahren häufig ein Prüfkopffarray aus Longitudinalwellenprüfköpfen verwendet [KRAUSE, 2001], mit dem Laufzeitkorrigierte Überlagerungen durchgeführt werden. Dabei werden mehrere Prüfköpfe über einen elektronischen Schalter nacheinander als Sender und Empfänger angesteuert. Somit wird eine große Anzahl an Messkurven aufgenommen und vom Rechner je nach Lage in der laufzeitkorrigiert und überlagert. Damit ist es möglich, Störeinflüsse wie das Kornrauschen statistisch auszulöschen. Bei 100 überlagerten Messkurven verbessert sich das Verhältnis von Rückwandecho zu Störsignal dann um den Faktor zehn.

Messungen mit Longitudinalwellen (Anhang A.2.5) ergaben, dass der beschriebene Einfluss der verschiedenen anatomischen Richtungen auf die Schallgeschwindigkeit berücksichtigt werden muss [HASENSTAB, 2002, 2].

So erscheinen Abstände in axialer Richtung durch die hohe Schallgeschwindigkeit als verkürzt und lassen eine geringere Bauteildicke annehmen, wogegen durch die sehr langsamen Schallgeschwindigkeiten in tangentialer Richtung, das Bauteil zu dick erscheint.

Mit einer Ankopplung von Sender und Empfänger entlang der Faser, werden die Einflüsse der unterschiedlichen Geschwindigkeiten in die verschiedenen anatomischen Richtungen ausgeschlossen, was dann aber zu hohen Schallgeschwindigkeiten der Longitudinalwellen in axialer Richtung, zu einer scheinbar geringere Bauteildicke führte.

Die in früheren Kapiteln beschriebenen Erkenntnisse zu Scherwellen an Holz ergaben, dass bei Scherwellen die Schallgeschwindigkeit in den unterschiedlichen anatomischen Richtungen sehr ähnlich sind. Dies würde bedeuten, dass mit der Laufzeitkorrigierten Überlagerung bessere Ergebnisse zu erwarten wären. Ergebnisse erster Messungen können Anhang A.2.5 entnommen werden. Messungen mit Transversalwellen wurden mit zwei einzelnen Prüfköpfen durchgeführt und waren demzufolge sehr langwierig.

Sehr gute Ergebnisse wurden mit dem kürzlich beschafften Gerät A1231 (Abbildung 80) erzielt. In diesem Fall sendet ein Prüfkopf und 35 empfangen. Dies bedeutet, dass bei einer Messung 1225 Kurven überlagert werden. Ergebnisse einer Messung am Referenzkörper R sind in Abbildung 81 zu sehen. Weitere vielversprechenden Ergebnisse siehe Anhang A.2.5.



Abbildung 80: Unteransicht des Prüfkopfes A1231 mit Punktkontaktprüfköpfen für Transversalwellen

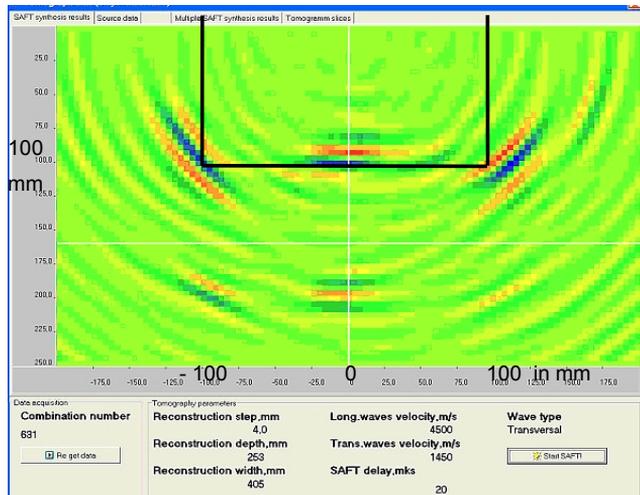


Abbildung 81: SAFT-Bild einer Messung am Probekörper R (10 cm x 20 cm) mit Echo an der Rückwand und den Ecken. Abmessungen des Probekörpers als schwarze Linie eingezeichnet.

6.7 Ultraschallverfahren mit Ankopplung über Luft

Um ein Bauteil mit Ultraschall prüfen zu können, muss der Schall in den Probekörper geleitet werden und nach dem Durchlaufen empfangen werden. Dafür wird am Probekörper mit und ohne Koppelmittel angekoppelt. Eine Ankopplung über Luft hat den sehr großen Vorteil, dass die Messungen berührungslos erfolgen. Besonders am stark saugenden und empfindlichen Holz hat dies große Vorteile.

Nach der erfolgreichen Übertragung der Kenntnisse der Ultraschallecho-Technik vom Beton auf Holz wurde im Rahmen der Promotion auch untersucht, ob sich die guten Ergebnisse der Betonuntersuchung mit luftgekoppeltem Ultraschall auch an Holz erzielen lassen. So wurden zusammen mit dem Ingenieurbüro Dr. Hillger nach ersten erfolgreichen Messungen an der BAM, Untersuchungen an Holzkörpern der BAM im Forschungslabor des Ingenieurbüros in Braunschweig fortgeführt.

Zur Anwendung kam das bildgebenden Ultraschallprüfsystem USPC 4000 Airtech [HILLGER, 2004].

Dabei wurden Sendesignale mit 100 kHz (Abbildung 82 links) und 200 kHz (Abbildung 82 rechts) verwendet.

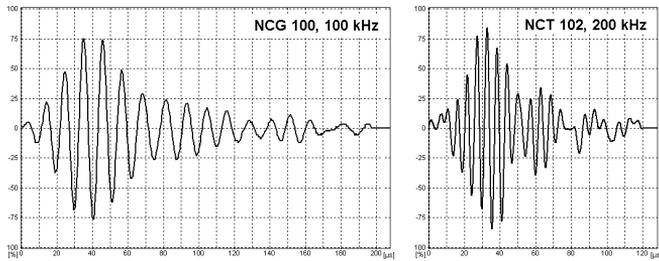


Abbildung 82:
Sendesignal mit Laufzeit
in μs , links bei 100 kHz;
rechts: bei 200 kHz

Die verwendeten Schallbündel ergaben bei 100 kHz (Abbildung 83) mit einem Durchmesser von 24 mm und bei 200 kHz (Abbildung 84) einen Durchmesser von 8 mm.

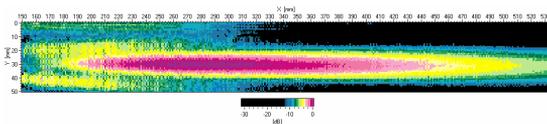


Abbildung 83: Schallbündel bei 100 kHz,
Durchmesser 24 mm

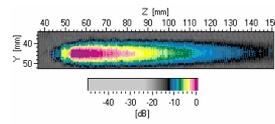


Abbildung 84: Schallbündel bei
200 kHz, Durchmesser 8 mm

Die Messung wurde in Transmission durchgeführt, wobei der Sender und der Empfänger genau gegenüber positioniert sind und eine Messfläche mit einem Scanner abgerastert wird. Die Ergebnisse werden sofort am Bildschirm dargestellt.

In Abbildung 85 ist der Kiefernprobekörper P1 zu sehen, dessen Bohrungen senkrecht zur Faser und Minderdicke in der schematischen Zeichnung Abbildung 86 dargestellt sind.

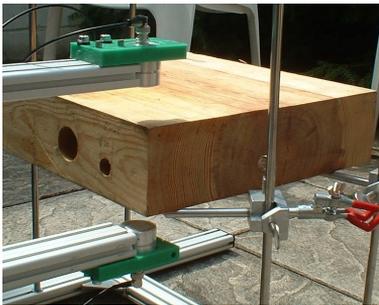


Abbildung 85: Messung mit
luftgekoppeltem Ultraschall an
Probekörper P1 aus Kiefer
(36 cm x 20 cm x 9,5 cm) aus dem
halben Kern geschnitten; hoher,
nahezu rissfreier Kernholzanteil

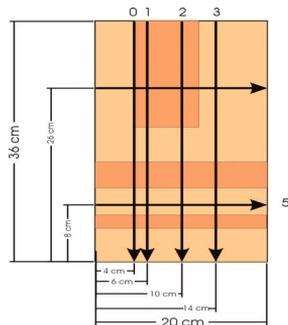


Abbildung 86: Skizze von Probekörper
P1 mit großer Bohrung ($D = 30\text{ mm}$)
und kleiner Bohrung ($D = 10\text{ mm}$) und
Minderdicke

Eine Messung mit einer Prüffrequenz von 200 kHz ergab das C- Bild der Schallschwächung in Abbildung 87 und das D-Bild der Schallgeschwindigkeiten in Abbildung 88.

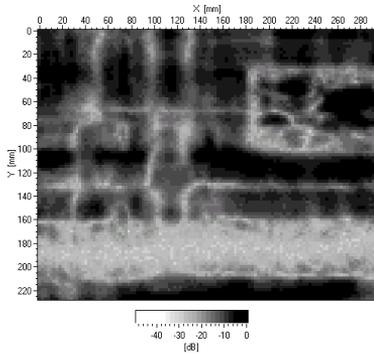


Abbildung 87: C-Bild der Schwächung über die Fläche bei 200 kHz von P1

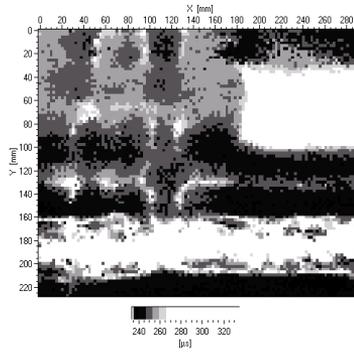


Abbildung 88: D-Bild der Schallgeschwindigkeit über die Fläche bei 200 kHz von P1

In beiden Messungen ist deutlich ein rechteckiger Bereich in der rechten Hälfte mit hoher Dämpfung und geringer Geschwindigkeit zu erkennen, welcher der Minderdicke zugeordnet werden kann.

Ebenso klar ist ein Bereich höherer Dämpfung bzw. geringerer Geschwindigkeit parallel zur x-Achse zu erkennen, welcher durch den innersten Kern mit zugehörigen sternförmigen Schwindrissen verursacht wird. Senkrecht zur x-Achse sind im C- und D-Bild drei Linien mit höherer Dämpfung und geringerer Geschwindigkeit sichtbar, wobei die linke der Bohrungen mit 10 mm Durchmesser und die rechten beiden, den Kanten der Bohrung mit 30 mm Durchmesser zugeordnet werden kann.

Dazu ergänzend ist in Abbildung 89 ein Profil der Laufzeiten entlang Messlinie 1 (Abbildung 86) dargestellt, in dem deutlich die Minderdicke und schwach beide Bohrungen zu erkennen sind.

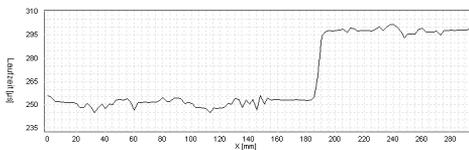


Abbildung 89: Laufzeitenprofil einer Messung entlang Messlinie 1 mit 200 kHz. Deutlich zu sehen ist die höhere Laufzeit im Bereich der Minderdicke, schwach zu sehen die beiden Bohrungen

Am Kiefernprobekörper P2 (Abbildung 90) wurde untersucht, in wieweit Bohrungen in Faserrichtung detektiert werden können. Die unterschiedlichen Längen der Bohrungen können der Skizze von P2 (Abbildung 57) und einer Röntgenaufnahme (Abbildung 91) entnommen werden.



Abbildung 90: Messung mit luftgekoppeltem Ultraschall an Probekörper P2 aus Kiefer (36 cm x 20 cm x 9,5 cm) aus dem halben Kern geschnitten; hoher, nahezu rissfreier Kernholzanteil, Bohrungen zur Simulation von Innenfäule

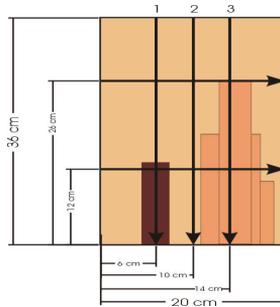


Abbildung 57: Schematische Draufsicht des Kiefernholzkörpers mit Verlauf der Messlinien 1-5 und eingebrachten Bohrungen (einzelne Bohrung $D = 30$ mm, Lochgruppe $D = 10$ mm).

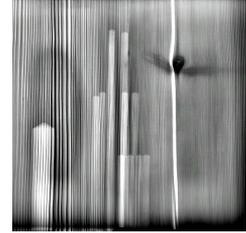


Abbildung 91: Röntgenaufnahme von P2 mit 60 kV, 4 mA, Isovolt 320 kV und Flatpanel AgfaDirectRay am-Se (mit BAM VIII.3)

Die Messungen der Schwächungen sind in Abbildung 92 für eine Prüffrequenz von 100 kHz und in Abbildung 93 für eine Messfrequenz von 200 kHz angegeben.

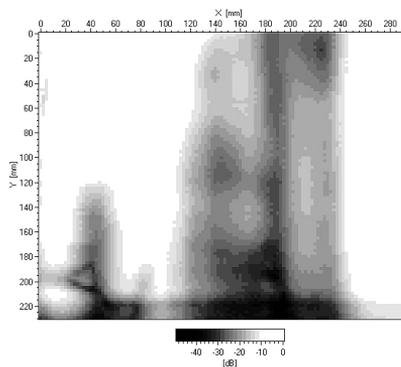


Abbildung 92: C-Bild von Messung an P2 mit 100 kHz

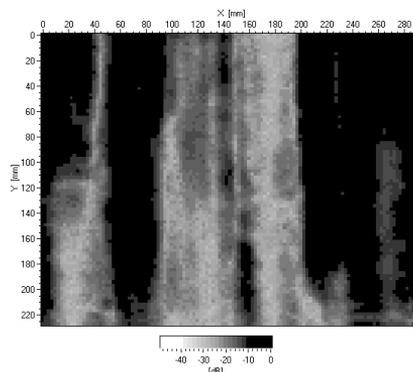


Abbildung 93: C-Bild von Messung an P2 mit 200 kHz

Ein Vergleich beider C-Bilder zeigt, dass bei einer Messfrequenz von 200 kHz sowohl große Areale mit Schwächungen detektiert werden, als auch eine höhere Auflösung erzielt wird. So wird ein Riss in Verlängerung der großen Bohrung und der ungeschädigte Bereich zwischen der Lochgruppe aus kleinen Bohrungen und dem Kernbereich erst mit einer Prüffrequenz von 200 kHz deutlich.

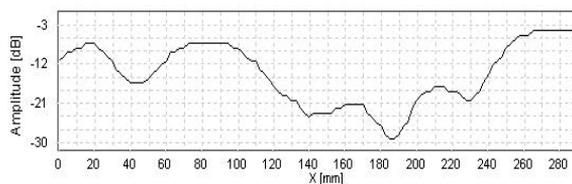


Abbildung 94: Amplitudenprofil einer Messung entlang Messlinie 5

In Abbildung 94 ist ein Amplitudenprofil entlang Messlinie 5 (Abbildung 57) dargestellt, bei dem sowohl die einzelne Bohrung als auch die Lochgruppe und der Riss als Dämpfung deutlich zu erkennen sind.

Die maximal durchschallbaren Probekörperabmessungen sind nicht bekannt, da die maximalen Abmessungen der vorhandenen Probekörper mit 12 cm Dicke (Fichte) eines BSH-Binders begrenzt war, bei dem auch sehr gute Signale empfangen wurden.

Mit der Apparatur USPC 4000 Airtech von Hillger ist es möglich, Holzprobekörper mit Dicken von 12 cm zu Durchschallen. Weiter konnten Minderdicken und eingebrachte Bohrungen detektiert werden. Dabei war eine Ortung der Bohrungen mit einer Ausdehnung in Faserrichtung deutlicher zu detektieren als Bohrungen mit einer Bohrrichtung senkrecht zur Faser. Somit ist eine Ortung von inneren, verdeckten Schäden in Faserrichtung gut möglich. Weiterhin ist es möglich, Risse im Holz zu detektieren, wobei mit einer höheren Frequenz (200 kHz) die Auflösung zunimmt und deutlich mehr Risse geortet werden können.

Für eine Praxisanwendung ist die Ultraschall-Durchschallung mittels Ankopplung über einen Luftspalt bei einer beidseitigen Zugänglichkeit sehr gut geeignet, da die Bauteile auf innere Schäden hin schnell und berührungslos untersucht werden können und die Ergebnisse online dargestellt werden.

7 Ergebnisse der Echomessungen

Umfangreiche Untersuchungen zum Ultraschallecho-Verfahren mit Longitudinalwellen wurden bereits im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführt. Die erfolgreiche Anwendung des Verfahrens an ungeschädigten Hölzern und Probekörpern mit eingebrachten Fehlstellen ist in [HASENSTAB, 2002 (1), HASENSTAB, 2002 (2)] beschrieben. Darauf aufbauend werden in der vorliegenden Arbeit die Möglichkeiten und die Grenzen der Echotechnik sowohl mit den Longitudinal- als auch mit den neu hinzugenommenen Transversalwellen ausgetestet. Um beide Wellenarten vergleichen zu können, wurden verschiedene, sich aus der Praxis ergebende Problemstellungen wie Zustand der Messoberfläche, maximale Abmessungen, Risse, Bohrungen, Äste, Fäulnis und Riss in einem BSH, untersucht.

Alle folgenden Messungen wurden mit den Longitudinalwellenprüfköpfen G 0,2 GC bzw. der S/E-Einheit A1220 mit Transversalwellen durchgeführt.

7.1 Möglichkeiten und Grenzen von Ultraschallecho

7.1.1 Messoberflächen

Wie bereits in Kapitel 6.4 beschrieben, spielt der Zustand der Oberfläche für die Messungen eine große Rolle. Für Longitudinalwellen wird zur Ankopplung an glatten Flächen Ultraschall-Gel und an rauhen oder leicht unebenen Flächen Vaseline angewendet. Die Punktkontaktprüfköpfe des Transversalwellenprüfkopfs A1220 sind federnd gelagert und ermöglichen an glatter und leicht unebener Oberfläche eine sehr gute Schallübertragung. An vermüllten oder oberflächlich durch Insektenbefall oder Fäule geschädigten Bereichen ist eine gute Ankopplung nicht möglich.

In Abbildung 95 ist eine Messung an einem Sparren abgebildet, bei der das Rückwandecho teilweise abgeschattet ist. Zudem sind auch in einigen Bereichen die Oberflächenwellen stark gedämpft.

Eine genaue Untersuchung des dreiseitig zugänglichen Sparrens ergab, dass sowohl ein großer Ast als auch kleine Äste mit einer Lage in Ausbreitungsrichtung der Schallwellen nur zu einer leichten Abschattung der Rückwand führen. Hingegen stimmen die Areale mit einer starken Absorption der Signale sehr gut mit Bereichen großer Rauigkeit der Oberfläche überein, die fertigungsbedingt bei den Sparren vorkommen können. So ist für Transversalwellen eine Ankopplung an diesen rauhen, fasrigen Bereichen nicht sinnvoll und eine Untersuchung von Bauteilen mit dieser Oberfläche nicht möglich.

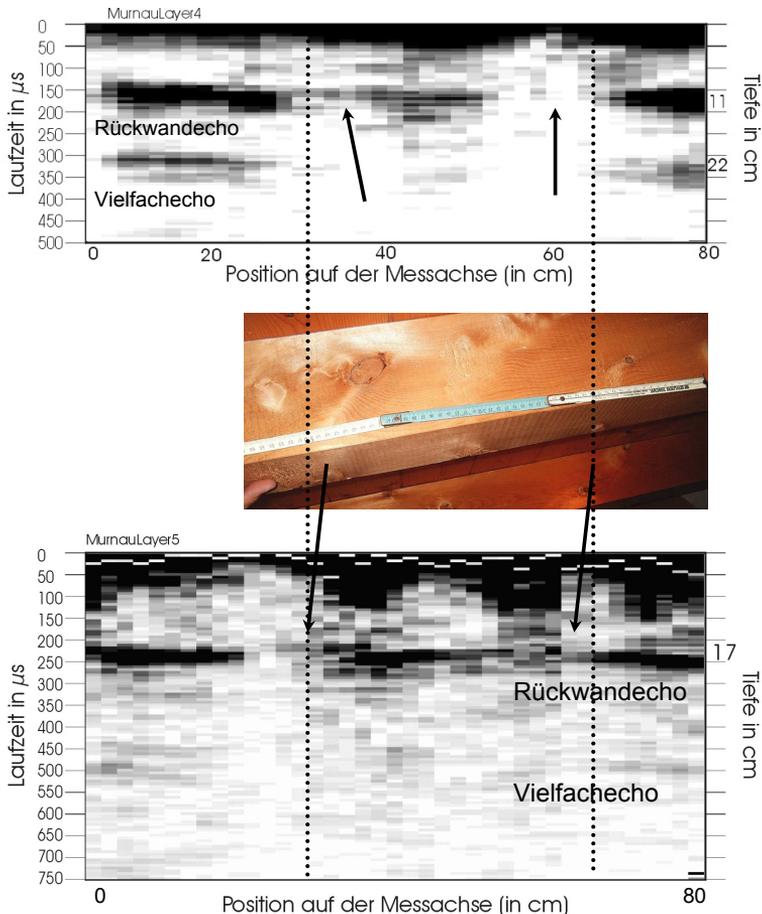


Abbildung 95: oben: B-Bild der Breite des Sparrens mit leichter Abschattung der Rückwand im Bereich eines Astes ($D = 5$ cm, linker Pfeil), völlige Abschattung der Rückwand und teilweise Absorption der Oberflächenwellen durch Unebenheit der Oberfläche (rechter Pfeil)

Mitte: Foto des Messbereichs mit Ast

Unten: B-Bild der Höhe des Sparrens mit Abschattung der Rückwand durch oberflächliche Störung bei der Ankopplung im Bereich von oberflächlichen Ästen (Pfeile)

7.1.2 Maximale Probekörperabmessungen

Echomessungen mit Longitudinal- und Transversalwellen an der dünnen Bauteilseite ($d = 9,5$ cm) des Referenzprobekörpers R (Abbildung 55) ergaben, dass das Rückwandecho deutlich dargestellt werden kann [HASENSTAB, 2002 (2), HASENSTAB, 2003].

Um die Messbarkeit der maximalen Bauteildicken auszutesten, wurden Echomessungen an der Breite des Bauteils ($b = 20$ cm) durchgeführt. Hier erfolgte die Echomessung so, dass das Rückwandecho bei 20 cm der Breite des Probekörpers entspricht. Mit Longitudinalwellen ($f = 75$ kHz, $\lambda = 3,1$ cm) ergab dies das B-Bild in Abbildung 96.

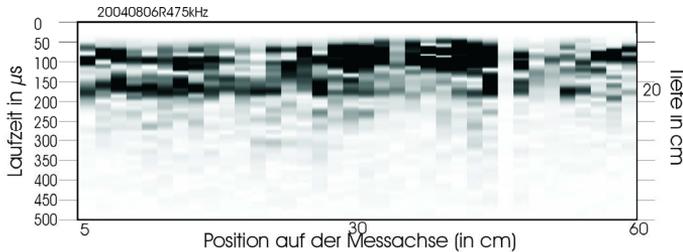


Abbildung 96: B-Bild einer Messung entlang Bauteilbreite des Probekörpers R mit Longitudinalwellen (75 kHz); teilweise Störung der Rückwand ($d = 20\text{ cm}$) obwohl das Bauteil keine Schädigungen aufweist durch Anisotropie

Obwohl keine Schädigungen vorhanden sind kommt es in einigen Bereichen zu einer Abschattung der Rückwand. Mit zunehmender Messfrequenz auf 100 kHz ($\lambda = 2,3\text{ cm}$) und 125 kHz ($\lambda = 1,8\text{ cm}$) nahmen die Störungen zu. Durch den anisotropen Aufbau des Holzes erfolgt der Schallweg (Gruppengeschwindigkeit) nicht genau in Richtung der Anregungsrichtung (Abbildung 33). Die Messungen mit den Transversalwellenprüfköpfen A1220 ($f = 55\text{ kHz}$, $\lambda = 2,4\text{ cm}$) ergaben das in (Abbildung 97) dargestellte B-Bild.

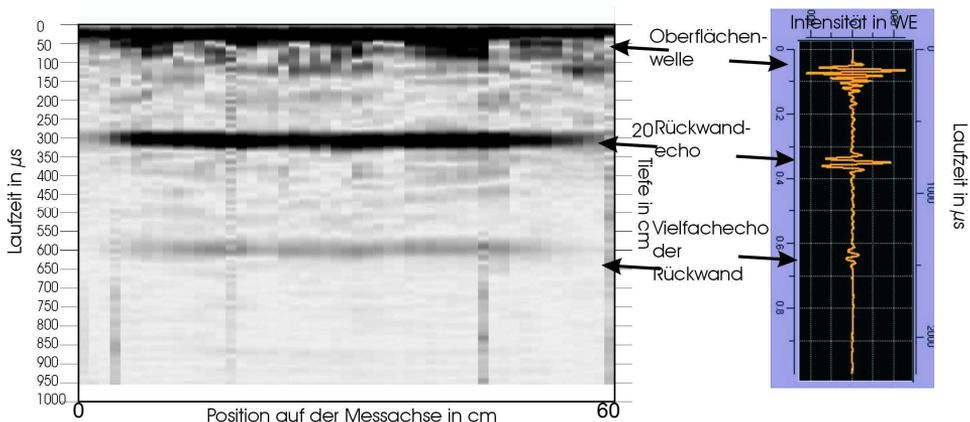


Abbildung 97: links B-Bild einer Messung entlang Bauteilhöhe des Probekörpers R mit Transversalwellen (55 kHz), rechts exemplarisch ein A-Bild; Deutliches, ungestörtes Rückwandecho mit Vielfachecho weisen auf ungeschädigten Zustand hin.

Hier ist neben den Oberflächenwellen ein klares Rückwandecho und ein Vielfachecho der Rückwand zu sehen. Anscheinend treffen die Probleme bei den Longitudinalwellen auf die Transversalwellen trotz ähnlicher Wellenlänge nicht zu. Ein Grund dafür ist, dass die Geschwindigkeiten der Transversalwellen kaum vom Faserwinkel in der RT-Ebene (siehe Abbildung 32) abhängt.

Messungen mit Transversalwellen an einem Eichenbalken mit einer Dicke von 26,6 cm ergaben mit Longitudinalwellen keine Ergebnisse, mit Transversalwellen schwache Rückwandechos. Mit Hilfe eines B-Bildes kann die Rückwand des Bauteils dargestellt werden (Abbildung 97).

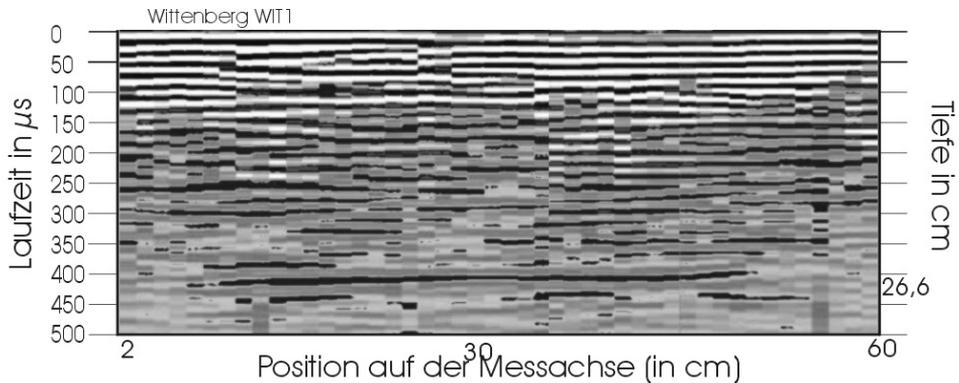


Abbildung 98: B-Bild einer Messung mit Transversalwellen (A1220, 55 kHz) entlang Probekörper WIT1, Eiche $d = 26,6$ cm (ergibt $v = 1330$ m/s), Rückwandecho nur im B-Bild bei 410 μs zu erkennen

Einen Vergleich der Wellenarten in der Praxis zeigen Messungen an Probekörpern aus Schloss Reinharz (siehe Kapitel A.5.1). Trotz optimaler Ankopplung der Longitudinalwellenprüfköpfe G 0,2 GC mittels Vaseline wurde eine Vielzahl von Signalen, welche aber weder der Rückwand noch den Rissen zugeordnet werden konnten, empfangen. Echomessungen mit Transversalwellen (A1220) waren hingegen sehr erfolgreich. Die maximale Bauteildicke die mit dem Handgerät A1220 gemessen wurde, wird in Kapitel 7.1.4 näher beschrieben. Dabei war es möglich, an einem 44 cm dicken Bauteil ein Vielfachecho zu erzielen.

7.1.3 Risse

Die Ursachen für Risse in Holz werden in Kapitel 3.1.5 und die Konsequenzen auf die Ultraschallwellen in Kapitel 5.3.3 erläutert. Einerseits stören Risse im Holz die Schadensortung durch Ultraschallverfahren, andererseits können sie selbst die Bauteilintegrität gefährden.

Die Messungen am ausgebauten Bauteil mit Schwindrissen (BER1 im Anhang A.5.2) zeigten, dass es mit Longitudinalwellen an dem Riss zu Totalreflexionen kam, wohingegen mit Transversalwellen neben den deutlichen Echos der Bauteilrückseite fast keine Echos vom Schwindriss empfangen wurden. D. h. Longitudinalwellen dienen zum Auffinden kleiner Schädigungen wie dem Schwindriss, mit Transversalwellen werden kleine Schäden eher ausgeblendet, und der dahinter liegende Bereich kann auf Schäden hin untersucht werden.

Bestätigt wurden diese Ergebnisse an Balken und Sparren mit großen Abmessungen (Schloss Reinharz, Anhang A.5.1). Hier konnten mit Transversalwellen sowohl intensive Rückwandechos als auch schwache Rissechos empfangen werden.

Verborgene, schadenswirksame, große Risse in Bauteilen können mit Transversalwellen geortet werden (Anhang A.4.2).

Breite Risse an der Messoberfläche können die Oberflächenwellen, die sich üblicherweise zwischen dem Sendekopf und Empfangskopf ausbreiten, auslöschen (Abbildung 116). Generell ist der störende Einfluss durch Risse auf die Messungen bei weitem geringer als befürchtet. Besonders gilt dies bei der Anwendung von Transversalwellen.

7.1.4 Riss in Brettschichtholz

Die Messungen an einem, von der MPA Stuttgart zur Verfügung gestellten Brettschichtholz-Binder (BSH- Binder) sind von großer Bedeutung, da hier zum ersten Mal versucht wurde, einen Riss in einem BSH- Binder als direktes Echo zu orten. Der BSH- Binder (Abbildung 58, 210 cm x 44 cm x 12 cm) wurde mit Longitudinalwellen und Transversalwellen mit unterschiedlichen Frequenzen untersucht. Der gesuchte Riss verläuft entlang der Brettlamellen parallel zur Oberfläche und hat nach visuellen Untersuchungen eine Ausdehnung ab der linken Kante von 88 cm. Die Rissspitze ist in den folgenden B-Bildern markiert.

Bei Messungen mit Longitudinalwellen und einer Messfrequenz von 100 kHz werden eine Vielzahl von Echos empfangen, die größtenteils den einzelnen Brettern zugeordnet werden konnten. Weitere Messungen mit 75 kHz ergaben vereinzelt Laufzeiten, die einem Echo am Riss zugeordnet werden konnten.

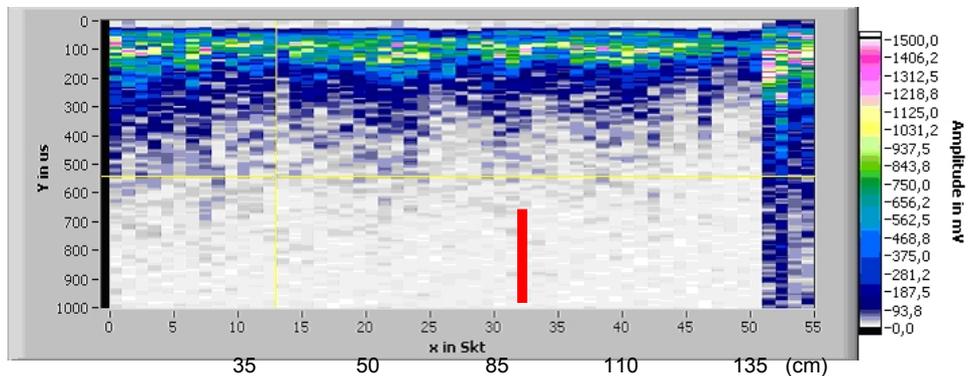


Abbildung 99: B-Bild einer Messung mit Longitudinalwellen (75 kHz) und RC2 Puls entlang der unteren Kante des BSH- Binders mit vereinzelt Echos der theoretischen Echolaufzeit am Riss von 190 µs, keine Rückwändechos. Als roter Strich ist die Rissspitze markiert.

Weiter wurden Messungen mit dem Transversalwellenprüfkopf A1220, mit 55 kHz und RC2 Puls durchgeführt und ergaben nur Echos an den einzelnen Brettern (3,3 cm dick), aber kein Rückwändecho des Bauteils. Um diese Echos an den Brettern auszuschließen wurde die Prüffrequenz reduziert, was zu einer Zunahme der Wellenlänge von 2,3 cm auf 4,3 cm führte. Eine Messung mit 30 kHz und dem RC2 Puls ergab das B-Bild in Abbildung 100. Hier sind in der linken Hälfte Echos am Riss und in der rechten Hälfte das Rückwändecho zu sehen.

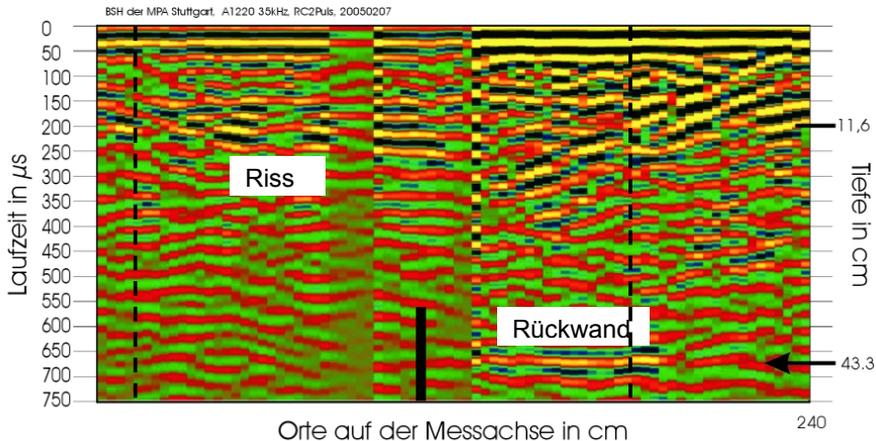


Abbildung 100: B-Bild einer Messung mit Transversalwellen (30 kHz) und RC2 Puls entlang der unteren Kante des BSH- Binders mit deutlichem Echo am Riss und an der Rückwand, gestrichelte Linien zeigen Position der A-Bilder (Abbildung 101, Abbildung 102), als schwarzer Strich ist die Risssspitze markiert.

Als Beispiel sind ein Signal des Rissechos als A-Bild in Abbildung 101 und ein Signal des Rückwandechos als A-Bild in Abbildung 102 dargestellt. Anhand der beiden Bilder kann überprüft werden, ob es sich bei den Echos auch tatsächlich um die Echos an den vermuteten Reflektoren handelt.

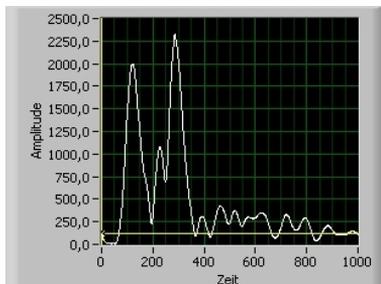


Abbildung 101: A-Bild des B-Bildes (Abbildung 100) entlang Spalte 2 mit deutlichem Echo am Riss (280 μs)

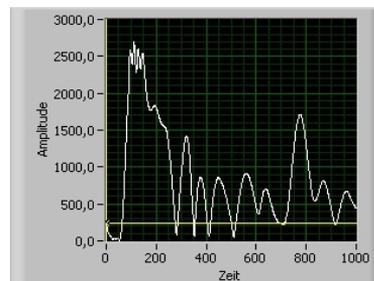


Abbildung 102: A-Bild des B-Bildes (Abbildung 100) entlang Spalte 58 mit deutlichem Echo an der Rückwand (760 μs)

Aus der Schalllaufzeit vom Rissecho von 280 μs und der Bauteildicke von 12,5 cm ergibt sich bei bekanntem Zeitversatz von 75 μs (für 30 kHz) die Geschwindigkeit von $v = 1,22 \text{ km/s}$. Mit dem Rückwandecho von 760 μs und der Bauteilhöhe von 43,3 cm ergibt sich eine Geschwindigkeit von $v = 1,26 \text{ km/s}$. Da beide Geschwindigkeiten innerhalb des üblichen Fehlerintervalls bei Schallgeschwindigkeiten von 4 % abweichen sind beide Geschwindigkeiten gleich und die Annahme, dass es sich um das Rissecho und das Rückwandecho handelt, war richtig.

Das Ergebnis einer Messung mit 55 kHz und Rechtecksender ist in Abbildung 103 dargestellt.

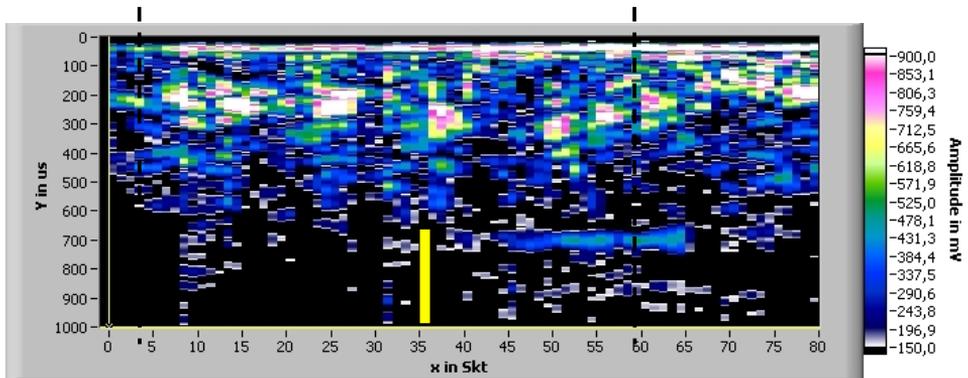


Abbildung 103: B-Bild einer Messung mit Transversalwellen (55 kHz) und Rechtecksender entlang der oberen Kante des BSH- Binders mit deutlichem Echo am Riss und an der Rückwand, gestrichelte Linien zeigen Position der A-Bilder, als gelber Strich ist die Riss Spitze markiert.

Auch hier ist die Rückwand des BSH- Trägers sehr deutlich in der rechten Hälfte der Abbildung zu erkennen. In der linken Hälfte sind Echos kürzerer Laufzeit zu erkennen, die dem Riss zugeordnet werden. In Abbildung 104 und Abbildung 105 sind A-Bilder der Messung in Abbildung 103 zu sehen.

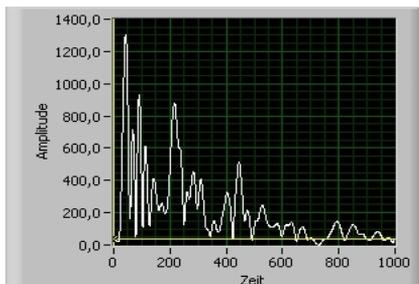


Abbildung 104: A-Bild des B-Bildes (Abbildung 103) entlang Spalte 2 mit deutlichem Echo am Riss (225 μ s) und weiterem Echo.

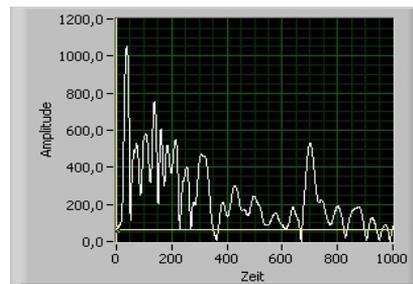


Abbildung 105: A-Bild des B-Bildes (Abbildung 103) entlang Spalte 59 mit deutlichem Echo an der Rückwand

Hier ergab die Überprüfung der Schalllaufzeiten zu Riss und Bauteilrückwand identische Schallgeschwindigkeiten.

Messungen mit dem Handgerät A1220 mit 55 kHz ergaben das B-Bild in Abbildung 106. Dabei ist ein deutliches Echo am Riss und an der Rückwand zu erkennen. Die Zuordnung der Schalllaufzeiten zu den Reflektorentiefen ergab eine Genauigkeit von besser als 1 %.

Fazit:

Von den beschriebenen Verfahren eignen sich die Transversalwellen besser als die Longitudinalwellen zur Untersuchung des BSH- Binders. Zudem zeigte sich, dass mit Rechtecksignalen auch mit höheren Messfrequenzen noch gute Ergebnisse erzielt werden können. Die besten Resultate wurden mit dem Handgerät A1220 erreicht, welches für die Praxismessungen weiter eingesetzt wird.

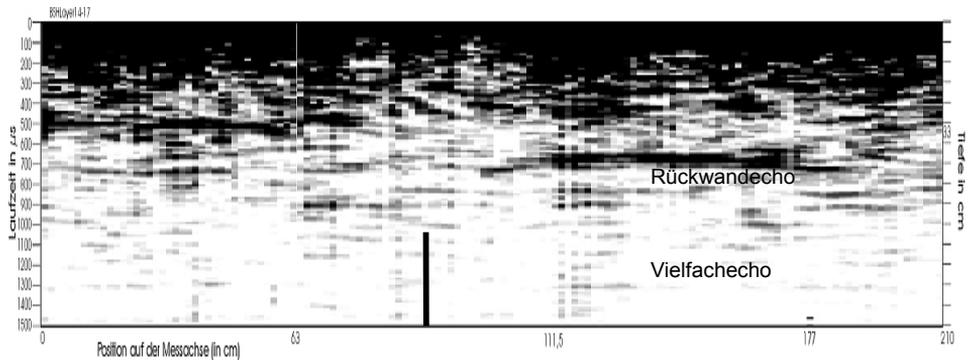


Abbildung 106: B-Bild einer Messung mit Transversalwellen (55 kHz) Handgerät A1220 entlang der **unteren** Kante des BSH- Binders mit deutlichem Echo am Riss (Tiefe 33 cm) und an der Rückwand (Tiefe 44 cm), die schwarze Linie zeigt Ende des Risses laut Veröffentlichung [AICHER, 2002] an. Das Vielfachecho bedeutet, dass der Schall den Weg von etwa 176 cm zurückgelegt hat!

7.1.5 Bohrungen

Eine Messung entlang Messlinie 1 (Abbildung 57) am Probekörper P2 (Abbildung 56) mit Longitudinalwellen wird in Abbildung 107 gezeigt. Dabei ist deutlich das Echo an der Bauteilrückwand (links) und an der Bohrung in Faserrichtung mit einem Durchmesser von 3,0 cm zu sehen. Dass trotz beginnender Bohrung noch Signale von Bereichen der Rückwand empfangen werden, liegt an der Prüfkopfanzordnung mit der Verbindungslinie parallel zur Faser und der Abstrahlcharakteristik der Prüfköpfe.

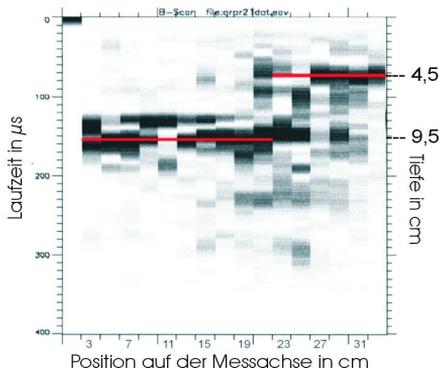


Abbildung 107: B-Bild einer Messung mit Longitudinalwellen (100 kHz) entlang Messlinie 1 (Abbildung 57) des Probekörpers P2 (Abbildung 56) mit Echos der Rückwand und der Bohrung in Faserrichtung. Rot eingezeichnet sind die realen Bauteilabmessungen.

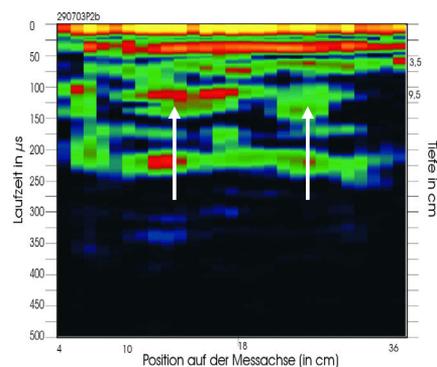


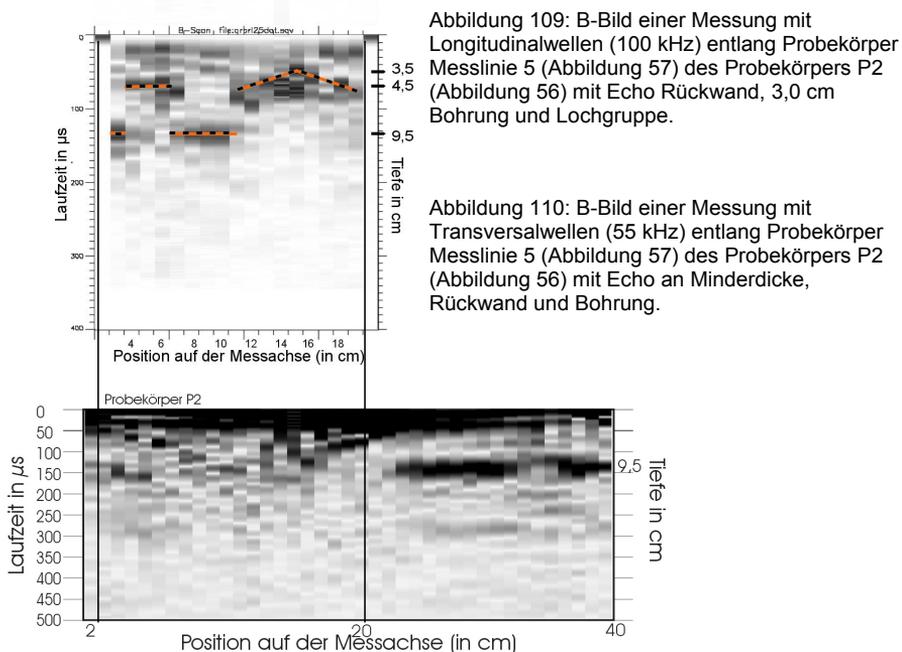
Abbildung 108: B-Bild einer Messung mit Transversalwellen (55 kHz) entlang Messlinie 1 (Abbildung 57) des Probekörpers P2 (Abbildung 56) mit Echo an Rückwand (linker Pfeil) und Bohrung (rechter Pfeil).

Eine Vergleichsmessung mit Transversalwellen mit einer Polarisation der Schwingungsrichtung parallel zur Faser entlang der gleichen Messlinie ist in Abbildung 108

zu sehen. Dabei kann links das Rückwandecho bei $120\ \mu\text{s}$ gut erkannt werden, das dann auf der rechten Seite von der Bohrung gestört wird. Schwach zu erkennen sind Signale mit einer Laufzeit von $175\ \mu\text{s}$, die Randeffecten durch die kleinen Abmessungen des Probekörpers zuzuordnen sind. Die intensiven Signale mit einer Laufzeit von $220\ \mu\text{s}$ können keinen Bauteilgeometrien zugeordnet werden.

Eine weitere Messung am Probekörper P2 entlang Messlinie 5 ergab mit Longitudinalwellen das B-Bild in Abbildung 109. Das zugehörige B-Bild mit Transversalwellen zeigt Abbildung 110. Auch hier können mit den Longitudinalwellen sowohl die Rückwand als auch die Bohrung und Lochgruppe dargestellt werden.

Messungen an einem Probekörper mit Bohrungen senkrecht zur Faser können Anhang A.2.4 entnommen werden.



7.1.6 Äste

Aus systematischen Messungen ist bekannt, dass es bei Longitudinalwellen bei Störungen die durch Äste verursacht werden, zu einer Abschattung der Rückwand kommt. Da bereits bekannt war, dass die Abmessungen des nachfolgend gezeigten Sparrens durch die wegabhängige Absorption zu groß sind, wurde auf Messungen mit Longitudinalwellen verzichtet.

Die Messung mit Transversalwellen entlang eines Sparrens (Abbildung 111) ergab das B-Bild in Abbildung 112. Hier zeigt das Rückwandecho eine gleichmäßige Sparrenhöhe.



Abbildung 111: Messung mit A1220 an Sparren aus Fichte mit Untersuchung der Bauteilhöhe ($h = 17$ cm). Der oberflächennahe Ast (Pfeil) beeinflusst die Messungen.

Im Bereich eines oberflächennahen Astes mit einem Durchmesser von etwa 2 cm nimmt die Intensität des Rückwandechos stark ab (Abbildung 112), ist aber noch deutlich zu erkennen.

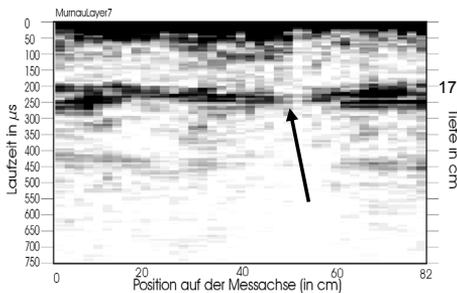


Abbildung 112: B-Bild des Sparrens mit Oberflächenwellen bis $70 \mu\text{s}$ und Rückwandecho der Sparrenhöhe, oberflächennaher Ast mit 2 cm Durchmesser dämpft das Signal und schattet das Rückwandsignal stark, aber nicht vollständig, ab.

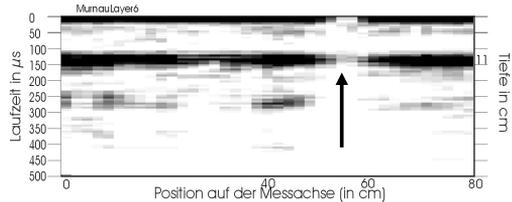


Abbildung 113: B-Bild des Sparrens mit Oberflächenwellen und Rückwandecho der Sparrenbreite (Ankopplung siehe Abbildung 186). Der Ast parallel zur Ausbreitungsrichtung der Schallwellen dämpft sowohl Oberflächenwellen als auch, das Rückwandecho.

Eine Messung auf der breiten Fläche des Sparrens ergab das B-Bild in Abbildung 113 mit deutlichem Echo der Rückwand. Im Bereich des Astes kommt es zu einer völligen Dämpfung der Oberflächenwellen und des Rückwandsignals. Dies liegt daran, dass der Ast diesmal parallel zur Ausbreitungsrichtung der Schallwellenausbreitung liegt und die Schallwellen so abgeschattet werden. Auffällig ist zudem, dass in einigen Bereichen Vielfachechos empfangen werden, in anderen nicht. Dies kann mit einem zu geringen Anpressdruck des Prüfkopfes an das Holz bei Messpositionen über Kopf erklärt werden.

Ein Vergleich der Longitudinal- und Transversalwellen wird am Probekörper P6 ($12 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 115 \text{ cm}$) aus Fichtenholz dargestellt. Es wurden Messungen mit Longitudinalwellen mit 75 kHz, 100 kHz und 125 kHz durchgeführt. In allen Messungen kommt es zu deutlichen Rückwandechos, wobei mit zunehmender Frequenz, d. h. kleinerer Wellenlänge, die inneren Inhomogenitäten zunehmen und zu einer Störung der Rückwand führen. Zudem weicht, wie beschrieben, durch die Anisotropie das Maximum der Schallintensität von der Anregungsrichtung ab. Eine zusätzliche Ursache für die schlechten Signale der Rückwand könnte die geringe Bauteilbreite von 6 cm sein, auf der mit den planaren Prüfköpfen ($D =$

4,5 cm) kein ausreichender Abstand vom Rand des Bauteils eingehalten werden kann und die Schallwelle sich nur schlecht ausbreiten kann. In Abbildung 114 ist eine Messung am Probekörper P6 mit 75 kHz als B-Bild zu sehen.

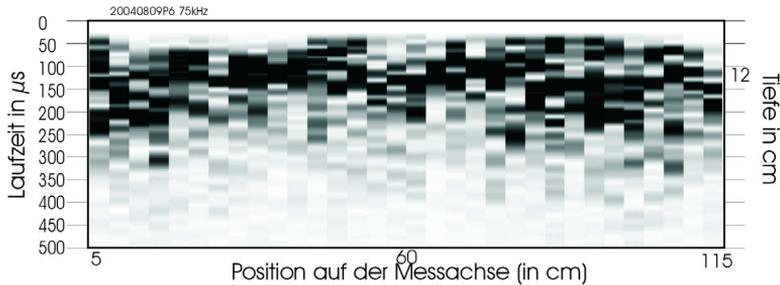


Abbildung 114:
B-Bild einer
Messung mit
Longitudinalwellen
entlang
Probekörper P6
(75 kHz)

Eine anschließende Messung mit Transversalwellen ergab das B-Bild in Abbildung 115. Hier fällt neben den sehr intensiven Rückwandechos mit einigen Vielfachechos ein Bereich auf, bei dem die Rückwand abgeschattet ist. Nachdem eine visuelle Untersuchung ergab, dass alle Oberflächen ungeschädigt sind, wurden zur genaueren Analyse vom fraglichen Bereich Röntgenuntersuchungen durchgeführt. Diese ergaben, dass sich in dem Bereich ohne Rückwandecho zwei Äste befinden, die offensichtlich die Schallsignale gestreut und abgeschattet haben. Zwischen den Ästen ist in einem kleinen Bereich wieder ein Rückwandecho zu empfangen.

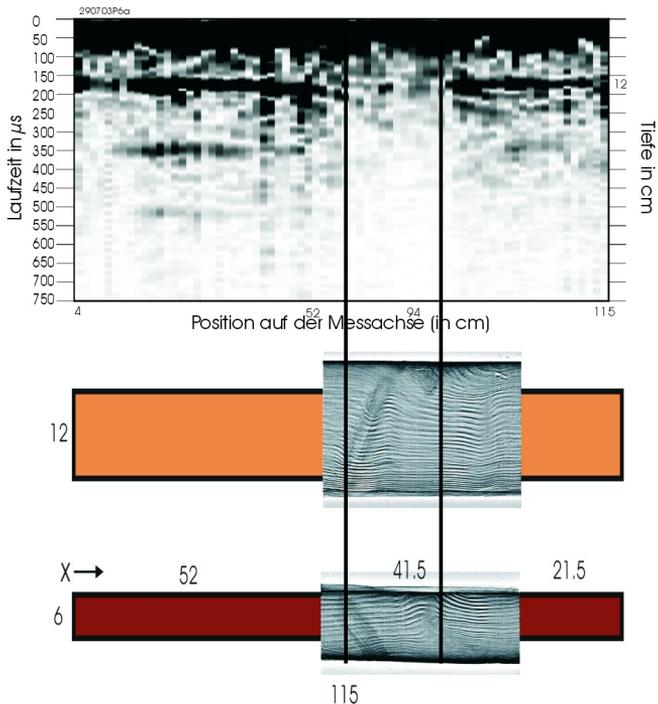


Abbildung 115: oben: B-Bild einer Messung mit Transversalwellen (55 kHz) entlang P6 mit Oberflächenwellen, deutlichen Rückwandechos und teilweisen Vielfachechos. Auffällige Abschattung der Rückwand mittig rechts kann durch Röntgenaufnahmen geklärt werden, die zwei Äste als ursächliche Streukörper zeigen. Durch das veränderte Holz um den Ast kommt es dennoch zu einem etwas größeren Bereich der Störung.

7.1.7 Fäulnis

Die Untersuchung an Bauteilen mit Fäulnis stellt eine sehr wichtige Aufgabe dar. Die ausgebauten Bauteile mit Fäulnisschäden hatten eine große Anzahl von kleinen Schwindrissen, was Echomessungen mit Longitudinalwellen wegen der hohen Streuung unmöglich machte. Deshalb wurden an solchen Bauteilen Transversalwellen eingesetzt.

In Abbildung 116 ist eine Messung entlang eines Probekörpers (SCH1, 12 cm x 23 cm x 54,5 cm) zu sehen.

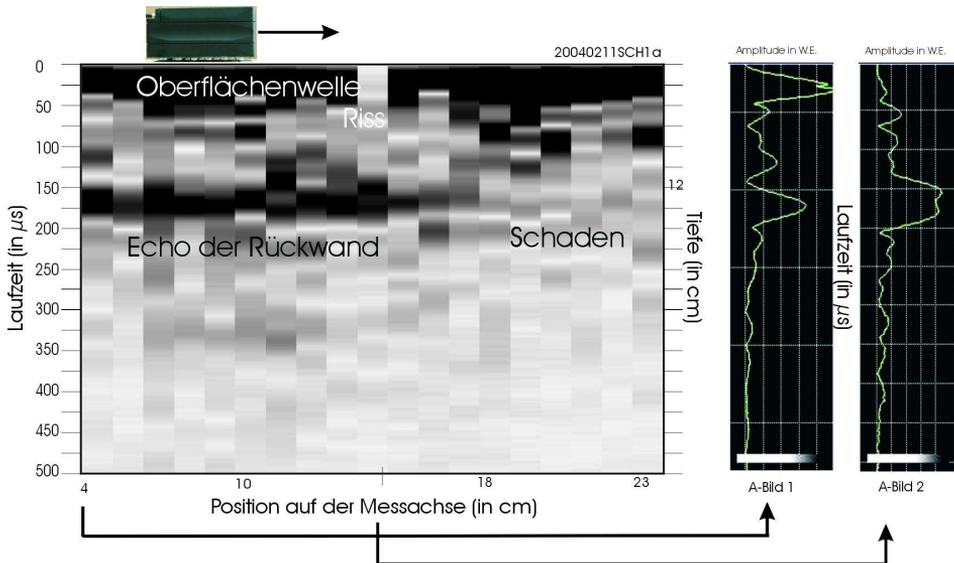


Abbildung 116: B-Bild einer Messung entlang Probekörper SCH1 (12 cm x 23 cm x 54,5 cm) mit Fäulnisschaden im rechten Teil der Messung, Schwindriss löscht Oberflächenwellen aus

Das deutliche Rückwandecho (siehe A-Bild 1 in Abbildung 116) der ersten Hälfte der Messung wird ab 16 cm abgeschattet. Eine genauere Untersuchung ergab, dass dies durch eine Schädigung von der Bauteilrückseite verursacht wird. Fäulnis wird also nicht als direktes Echo sondern indirekt, über die Abschattung der Rückwand detektiert. Beispiele hierfür können dem Anhang (A.4.1, A.5.1, A.5.2) entnommen werden.

Bei Betrachtung der Oberflächenwellen fällt auf, dass diese in einer Messlinie (siehe A-Bild 2 in Abbildung 116) völlig gedämpft werden, obwohl ein Rückwandecho zu empfangen ist. Die Ursache hierfür ist ein Schwindriss, der senkrecht zur Messrichtung verläuft und in der Position genau zwischen Sendeteil und Empfangsteil des Prüfkopfs die Oberflächenwellen dämpft.

7.2 Zusammenfassung der Echoergebnisse und Vergleich beider verwendeter Wellenarten

Die Ergebnisse zeigen, dass beide hier verwendeten Wellenarten für unterschiedliche Anwendungsbereiche geeignet sind.

Für beide Wellenarten ist eine Ankopplung am Bauteil erforderlich, wobei für die planaren Longitudinalwellenprüfköpfe Koppelmittel erforderlich sind. Mit den Punktkontaktprüfköpfen ist eine Ankopplung an glatten und auch etwas unebenen Oberflächen sehr gut möglich, außer an vermüllten oder sehr rauhen, zerfaserten Oberflächen. Hier kann mit einer Ankopplung mit viel Vaseline Abhilfe geschaffen werden.

So können mit den höher frequenten Longitudinalwellen auch kleine Schäden ($D = 3,0$ cm, Probekörper P2) in geringer Tiefe (3,5 cm) als direktes Echo klar dargestellt werden. Bei größeren Bauteilabmessungen (über 10 cm) hingegen bedeuten die größeren Schallwege einen größeren Einfluss der Anisotropie auf das Schallsignal, welches dann abgelenkt wird und was sich wiederum als Abschattung des Rückwandechos äußert. Dieser Effekt wird durch eine Zunahme der Frequenz also kleinere Wellenlänge, noch begünstigt. Zudem kommt es bei Messungen mit planaren Prüfköpfen ($D = 4,5$ cm) an Bauteilen mit geringer Breite (6 cm) zu Randeffekten, was die Messungen behindert und so sollten Messkörperbreiten von 10 cm (\triangleq ca. 3λ) nicht unterschritten werden.

Durch den geringen Einfluss der Anisotropie auf die Schallsignale ist die Ablenkung bei den Transversalwellen geringer. Auch bei Bauteildicken über 20 cm können neben Rückwandechos sogar Vielfachechos empfangen werden.

Die Grenzen sind bei Transversalwellen im Gegensatz zu den Longitudinalwellen im Nahbereich. Hier sind sowohl die Auflösung durch die Prüfkopfbreite, den Nahbereich als auch zu geringe Bauteilabmessungen in der Messrichtung der Schallwellen ein Problem. So können Signale kurzer Laufzeit (unter 90 μ s) oft nur schlecht oder nicht von Oberflächenwellen und Echos an Bauteilgrenzen unterschieden werden. Allgemein sollte bei der Auswertung von Messungen an Bauteilen unter 10 cm Dicke besonders umsichtig vorgegangen werden.

Die Messungen an fäulegeschädigten Bauteilen mit Ästen und dem BSH- Bilder mit Riss ergaben, dass Longitudinalwellen für Bauteile mit vielen kleinen Rissen oder zu großen Abmessungen nicht geeignet sind. Mit Transversalwellen konnte die Fäule und der Riss gut geortet werden.

Zudem werden Äste im allgemeinen nicht direkt als Reflektor erkannt, sondern von den Wellen umlaufen und führen somit zu einer leichten Abschattung der Rückwand. Kleinere Äste mit Durchmessern von 1 bis 2 cm im Bauteil sind, bezogen auf die Größe des Senders und des Empfängers und die Wellenlänge, klein und stellen kein Problem dar. Sogar bei schräg verlaufenden größeren Ästen ($D = 5$ cm) ist kein direktes Echo möglich. Wird direkt auf einem Astloch angekoppelt, kann es sein, dass die Schallenergie entlang des Astes abgeleitet wird und weder Oberflächenwellen noch Rückwandechos empfangen werden, d. h. keine Überprüfung der Rückwand möglich ist.

Dies zeigt, dass je nach Prüfaufgabe sich die optimale Wellenart unterscheidet.

7.3 Zusammenfassung Ultraschall

Longitudinalwellen werden seit vielen Jahren ausführlich in Transmission an Holz zur Werkstoffprüfung angewendet.

Erstmalige Erfolge mit der Ultraschallecho-Technik wurden im Zuge einer Diplomarbeit an ungeschädigten Probekörpern und Probekörpern mit eingebrachten Bohrungen und Minderdicken erzielt [HASENSTAB, 2002 (2)]. Auf diese Arbeit aufbauend wurden Versuche mit Transversalwellen an Holz durchgeführt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine neue Messapparatur aufgebaut und die bisherigen Komponenten praxismäßig verkleinert, wobei alle Veränderungen des Versuchsaufbaus durch Vergleichsmessungen überprüft wurden.

Die Optimierung der Prüfköpfe und Prüffrequenzen ergibt, dass die Longitudinalwellen weiterhin mit den planaren Prüfköpfen G 0,2 GC angeregt wurden, da die Punktkontaktprüfköpfe LD 120 durch die hohe Schallschwächung im Holz keine Echomessungen ermöglichten. Transversalwellen wurden sowohl mit den einzelnen Punktkontaktprüfköpfen TD 20 als auch mit der leistungsstarken Sende/ Empfangseinheit A1220 bestehend aus 12 Prüfköpfen als Sender und 12 Prüfköpfen als Empfänger angeregt. Sehr vorteilhaft ist zudem, dass diese Art von Prüfköpfen keine Koppelmittel benötigen.

Die optimale Prüffrequenz war für Longitudinalwellen eine Mittenfrequenz von 100 kHz, für Transversalwellen eine Mittenfrequenz von 55 kHz. An Bauteilen mit Abmessungen größer als 40 cm wurden wegen der laufwegabhängigen Dämpfung eine niedrigere Frequenz von 33 kHz eingesetzt.

Als Sendeimpuls diente sowohl der programmierte CS-Impuls als auch ein Rechteckimpuls und es zeigte sich, dass bei großen Bauteilabmessungen mit dem Rechteckimpuls bessere Ergebnisse erzielt werden konnten.

Die Untersuchung der Ankopplung der Prüfköpfe an den verschiedenen Probekörperoberflächen zeigte, dass für die planaren Prüfköpfe an glatten und an sägerauen Oberflächen auf das rückfettende Koppelmittel Vaseline verzichtet werden kann und mit Ultraschall-Gel oder Plastiline die gleichen Ergebnisse erzielt werden können. Letztlich war nur für eine Ankopplung an unebenen Oberflächen Vaseline erforderlich. Die federnd gelagerten Prüfköpfe des Transversalwellenprüfkopfs A1220 können an allen ebenen und leicht unebenen Oberflächen angekoppelt werden. Nur an sehr rauen, zerfaserten oder mit Würfelbruch geschädigten Flächen ist eine Schallübertragung und damit eine Messung nicht möglich.

Die Messungen ergaben bei allen Prüfköpfen, dass bei einer Verbindungslinie der Prüfköpfe senkrecht zur Faserrichtung die Oberflächenwellen stark gedämpft wurden. Messungen mit einer Verbindungslinie parallel zur Faser ergaben bei den Transversalwellenprüfköpfen solche intensive Oberflächenwellen, dass eine Auswertung des Rückwandechos so gut wie unmöglich war.

Allgemein verursachen Oberflächenwellen beim S/E-Prüfkopf A1220 eine „Tote Zone“ von 90 μ s, bei der etwaige Echos von Reflektoren geringer Tiefe von Signalen der Oberflächenwellen überlagert werden und eine Auswertung unmöglich machen können.

Es zeigte sich, dass die Polarisationsrichtung der Transversalwellen in Bezug auf die Faser von sehr großer Bedeutung ist. Eine Polarisationsrichtung der Wellen parallel zur Faser führt zu einer sehr guten Schallübertragung, was eine Untersuchung von Bauteilen großer Abmessungen möglich macht. Deshalb wurde diese Polarisation für alle Echountersuchungen angewendet.

Zur Bestimmung aller sechs möglichen Transversalwellengeschwindigkeiten bei Holz (zusammen mit den drei Longitudinalwellengeschwindigkeiten neun mögliche Geschwindigkeiten), die sich aus den drei anatomischen Richtungen axial, radial und tangential sowie der Polarisationsrichtung der Schallwelle parallel und senkrecht zur Faser zusammensetzen, wurden auch Versuche mit einer Schwingungsrichtung senkrecht zur Faser durchgeführt. Diese ergaben neben einer enormen Schallschwächung auch, dass in Echoanordnung nur Oberflächenwellen empfangen werden können.

In der Literatur sind die Schallgeschwindigkeiten nur mit hohen Frequenzen wie 500 kHz oder 1000 kHz bestimmt worden. Ein Vergleich der Literaturwerte mit den Werten bei der in dieser Arbeit verwendeten niederfrequenten Anregung ergaben, dass die Ergebnisse an Kiefer bei einer Schwingungsrichtung der Transversalwellen in Faserrichtung mit 1300 m/s sehr gut übereinstimmen.

Basisuntersuchungen mit Ultraschall in Transmission bei Ankopplung über Luft zeigen, dass Minderdicken und Bohrungen gut detektiert werden können.

Untersuchungen an Probekörpern mit eingebrachten Fehlstellen und ausgebauten Bauteilen ergaben, dass die besten Ergebnisse mit Longitudinalwellen an kleineren (< 10 cm) und mit Transversalwellen an größeren (> 10 cm) Bauteilabmessungen erzielt wurden, was mit den verwendeten Wellenlängen und dem Schwingungsverhalten der Schallwellen zu begründen ist.

Weiter zeigte sich, dass sich Schäden, wie Fäule, Äste, Insektenschäden indirekt durch eine Abschattung der Bauteilrückwand oder direkt als Echo an Minderdicken oder Rissen äußern. Mit einer genauen Betrachtung der A-Bilder kann zwischen einer allmählichen Abnahme der Rückwandechos durch Fäule oder einer plötzlichen Abschattung durch eine Bohrung unterschieden werden.

Daraus ergab sich die weiterführende Frage, wie man einerseits die Ergebnisse verifizieren könnte, andererseits die in Echotechnik lokalisierten Schäden noch genauer klassifizieren könnte. Als Lösung bot sich unter anderem das Röntgenverfahren an, auf das im nächsten Kapitel näher eingegangen wird. In wieweit das Ultraschallecho-Verfahren tatsächlich in der Praxis funktioniert und mit welchen Verfahrenskombination sie weiter optimiert werden kann folgt in Kapitel 9.

8 Röntgenexperimente an Holz

Wie beschrieben ergaben Messungen am Fichtenprobekörper P6 (Kapitel 7.2), dass das Rückwandecho geschwächt oder abgeschattet sein kann und so in vielen Fällen kein Echo der Rückwand gemessen werden kann. Aus dem Messergebnis kann also die Ursache für die Schwächung des Rückwandechos wie z. B. durch eine schlechte Ankopplung der Prüfköpfe, nicht direkt entnommen werden. Deshalb ist es besonders wichtig, die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen im Rahmen der Verfahrensentwicklung zu verifizieren.

Neben der zerstörenden Prüfung bietet sich für diese Verifizierung die Untersuchung mit der zerstörungsfreien Durchstrahlung mittels Röntgenstrahlung an.

Hierfür kam es zu einer sehr guten Zusammenarbeit mit der Abteilung VIII.3, der BAM, wo alle Röntgenuntersuchungen mit den stationären und mobilen Röntgenröhren durchgeführt wurden (Anhang A.3).

Dabei wurde vor allem die neuartige und empfindlichere digitale Radiographie verwendet, bei der anstelle eines Filmes, Detektoren verwendet werden. Zudem wurden mobile Blitzröhren angewendet, die eine mobile Messung außerhalb des Labors ermöglichen. Da zur Anwendung der Blitzröhre an Holz auf keine veröffentlichten Forschungsergebnisse aufgebaut werden konnte, wurden zusätzliche Untersuchungen an geschädigten Balken und Baumteilen durchgeführt. Ferner wurde die Aussagekraft der Röntgenergebnisse durch eine spezielle mathematische Filterung der Daten verbessert.

Zudem können mit der mobilen Röntgentechnik Untersuchungen an Bauteilen, an denen eine direkte Ankopplung durch Parkett oder Stuckdecke mittels Ultraschallecho nicht möglich ist, dennoch untersucht werden. Auch Bäume mit einer unebenen Rinde, die eine Ankopplung von Ultraschallecho verhindert, können mittels Radiographie untersucht werden (Anhang A.5.3).

Die Ergebnisse der Röntgenmessungen bestätigen, dass sich diese Methode als Referenzverfahren für die Untersuchung von Probekörpern und ausgebauten Bauteilen als auch zu einer Verfahrenskombination eignet. In einigen Fällen liefern sie detailliertere Ergebnisse, so dass eine Optimierung durch Kombination leichter einsetzbarer Ultraschallverfahren mit der präziseren Röntgenstrahlung sinnvoll erscheint (Kapitel 9, Anhang A.5.1).

9 Praxisanwendung und Verfahrenskombination

Um die tatsächlich vorkommenden Schadensbilder zu analysieren wurden nach Rücksprache mit Denkmalpflegern und Holzschutzsachverständigen verschiedene, teils denkmalgeschützte Gebäude untersucht. Dabei wurden unter anderem im Rahmen einer vierwöchigen Fortbildungsmaßnahme beim Bauarchiv des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege sowohl im Kloster Thierhaupten als auch im Umland viele interessante Objekte besucht.

Ferner fanden Untersuchungen an Deckenbalken Berliner Mietshäuser, der Marienkirche in Wittenberg, in Schloss Reinharz bei Wittenberg und Messungen an Bauteilen im Kloster Thierhaupten, im Schloss Bellevue in Berlin, ferner in einer Kirche in Aichach bei Augsburg und im Haus 25 der BAM statt. Auch kritische Stellen in Neubauten wurden überprüft.

Besonders die Überprüfung der Integrität von nur teilweise zugänglichen Bauteilen spielt bei allen Bauwerken eine große Rolle. Hier ist bei statisch stark ausgelasteten und schlecht überprüfbaaren Bauteilen eine sorgfältige Untersuchung wichtig. Ebenso notwendig ist die genaue Kenntnis der Bauteilabmessungen, denn z. B. kann ein nicht sichtbares Zapfenloch in einer wiederverwendeten Stütze bei einer neuen, höheren Auslastung zu Spannungsüberschreitungen führen.

Nächster Teilpunkt der Arbeit war also zu testen, ob sich die zuvor optimierten Ultraschallverfahren auch für den Einsatz in der Praxis eignen. Wenn möglich wurden die Messungen mit einem etablierten Verfahren verifiziert. Zudem wird auch eine Steigerung der Aussagekraft der Ultraschallechomethode durch Verfahrenskombinationen angestrebt, wenn z. B. Hinweise auf etwaige Fehlstellen vorhanden sind (z. B. fehlendes Rückwandecho):

Teils werden an geschädigten, ausgebauten Bauteilen Anwendungsmöglichkeiten demonstriert oder auch Prüfaufgaben gelöst.

Der nächste Abschnitt bringt nun eine grobe Zusammenfassung der im Anhang ausführlich dargestellten Fallbeispiele.

Untersuchungen an einem Deckenbalken (22,5 cm x 37 cm) in einem Kloster zeigten, dass die, mit dem Ultraschallecho-Verfahren detektierte Auffälligkeit, mit dem zerstörungssarmen Bohrwiderstandsmessgerät eindeutig als Fäulnisschaden verifiziert werden konnte (Anhang A.4.1). Auch ein Riss in einem Sparren eines Neubaus konnte eindeutig detektiert werden (Anhang A.4.2).

Weiter wurde an historischen Holzkonstruktionen die Aufgabenstellung bearbeitet, welche Minderdicken durch Verkämmungen, Verzapfungen und Verblattungen durch die Konstruktion bestehen und mit dem Ultraschallechogerät A1220 geortet werden können. Die Messungen ergaben, dass Aussparungen senkrecht und parallel zur Tragrichtung von Stützen, aber auch Abmessungen bei Balkenstößen und die Lage von Holzdübeln parallel und senkrecht zur Lage geortet werden können (Anhang A.4.3).

Ein Vergleich der Ergebnisse mit Ultraschallecho und Durchstrahlung zeigt, dass bei allen Messungen der Schäden von beiden Verfahren mit der gleichen Tendenz gefunden wurde. Zudem kam es bei Anwendung des Ultraschallecho-Verfahrens zu einer Abschattung der Rückwand durch eine Schädigung immer vor einer Auffälligkeit im Röntgenbild. Dies könnte

daran liegen, dass die Ausbreitung der Ultraschallsignale bereits durch beginnende Fäule behindert wird und durch Würfelbruch viele Grenzflächen zu Luft entstehen, die für eine Röntgenaufnahme einen zu geringen Kontrastunterschied darstellen und so nicht erkannt werden können. Dieses Problem von Rissen senkrecht zur Einstrahlrichtung ist analog dazu aus der Werkstoffprüfung an Stahl bekannt [OSTERLOH, 2005] (Anhang A.5.1).

Eine Kombination beider Verfahren führte zu einer deutlichen Reduzierung der Falschaussagen (Anhang A.5.1).

Eine gemeinsame Anwendung von Ultraschallecho- und Durchstrahlungstechnik sowie LIBS (Kapitel 4.2.4) zeigte, dass mit Ultraschall die geschädigten Bereiche markiert, mit der Radiographie genaue untersucht, Fremdstoffe mit Dual-Energy erkannt und mit LIBS analysiert werden können.

An Bäumen mit rauher Rinde erwies sich die Ultraschallechomethode als schwierig, sodass hier nach Alternativen gesucht wurde und in Form der Radiographie (Kapitel A.2.4), Geoelektrische Tomographie (Kapitel 4.1.3) und Schalltomographie (Kapitel 4.2.6.3) gefunden wurde.

10 Schlussbetrachtung

10.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Schadensmechanismen bei Holz und der Stand der Technik der zerstörungsmindernden und zerstörungsfreien Prüfverfahren an Holz aus der Literatur zusammengestellt und diese hinsichtlich einer möglichen Ortung verdeckter Schadstellen diskutiert. Dabei wurden die verwendeten Verfahren Bohrwiderstand, Durchstrahlung und Ultraschall besonders intensiv behandelt, um auf vorhandenen Forschungsergebnissen aufbauen zu können.

Eigene, experimentelle Untersuchungen wurden mit Ultraschall in Echotechnik an Probekörpern mit realitätsnahen Nachbildungen von Fehlstellen und ausgebauten Bauteilen durchgeführt. Zudem wurden mit Röntgenstrahlung geschädigte Balken und Bäume untersucht.

Nach dem Aufbau einer Messapparatur wurden verschiedene Frequenzen, Pulsformen, Prüfköpfe, Koppelmittel, Ankoppelpositionen der Prüfköpfe relativ zur Faser, Wellenarten und deren Polarisationsrichtungen in Bezug auf die Faser getestet und optimiert.

Damit ergab sich für die Longitudinalwellenprüfköpfe G 0,2 GC eine Prüffrequenz von 100 kHz und eine Ankopplung an glatten Oberflächen mit Ultraschall-Gel, an rauen Oberflächen mit Vaseline. Die Punktkontaktprüfköpfe TD20 der Transversalwellen (Mittelfrequenz 55 kHz) benötigen keine Koppelmittel. Zudem kann mit dem Array aus 12 Prüfköpfen TD20 als Sender und 12 als Empfänger mehr Schallenergie in das Bauteil eingeleitet werden, und so auch Bauteile mit größeren Dicken untersucht werden. Da mit dem Transversalwellenprüfkopf Bauteile größerer Abmessungen ohne Koppelmittel untersucht werden können, wurden viele praktische Messungen mit Transversalwellen durchgeführt.

Die Versuche ergaben, dass es möglich ist, Niederfrequenz-Ultraschall in Echotechnik sowohl mit Longitudinal- als auch mit Transversalwellen an Holz erfolgreich anzuwenden. Dabei gelingt es, die Bauteilrückseite bei ungeschädigten Holzbalken sehr gut zu detektieren. An Bauteilen mit Dicken unter 10 cm wurden bessere Ergebnisse mit Longitudinalwellen, an den Bauteilen mit größeren Abmessungen (über 10 cm) bessere mit Transversalwellen erzielt.

Die Ortung der Schäden erfolgt indirekt, d. h. wenn bei sonst gleichen Bedingungen das Rückwandecho abgeschattet ist, d. h. kein Rückwandecho zu empfangen ist, was bei Fäulnis, oder Insektenschäden der Fall ist. In einigen Fällen können Minderdicken durch Aussparungen, Verblattungen, Zapfenlöcher oder Risse und Äste als Echo direkt geortet werden.

Dieses Echo kann dann mit einer, an einer zugänglichen Stelle bestimmten Schallgeschwindigkeit aus Schallweg und Schalllaufzeit eindeutig einer Tiefenlage zugeordnet werden.

Werden Bereiche mit Abschattungen der Rückwand lokalisiert, sind genauere Untersuchungen erforderlich. Diese wurden im Rahmen der Arbeit mit Bohrwiderstand oder

zerstörungsfrei mittels Durchstrahlung mit Röntgenstrahlung durchgeführt. Die Kombination von digitaler Radiographie und mobiler Blitzröhre wurde angewendet und für Untersuchungen an Bauteilen und Bäumen optimiert.

Ein Vergleich von Ergebnissen mit Ultraschallecho und Durchstrahlung an Probekörpern zeigt, dass bei allen Messungen der Schaden von beiden Verfahren mit der gleichen Tendenz gefunden wurde. Zudem war auffällig, dass es bei Anwendung des Ultraschallecho-Verfahrens zu einer Abschattung der Rückwand durch eine Schädigung immer vor einer Auffälligkeit im Röntgenbild kam.

Eine Kombination beider Verfahren führte zu einer deutlichen Reduzierung der Falschaussagen.

Mit Verfahrenskombination kann ein Schaden rationell untersucht werden: Das Ultraschallechoverfahren dient zur Untersuchung großer Bereiche. Damit können unter bestimmten Bedingungen, wie zugängliche, rissarme, ungeschädigte Oberfläche, schnell Areale mit Auffälligkeiten bestimmt werden. Diese Bereiche können dann an auffälligen Punkten mit der Bohrwidstandsmethode in der Tiefenlage und Art des Defekts bestimmt werden, oder mittels Durchstrahlung bildlich dargestellt werden.

10.2 Praktische Anwendungsbereiche und Möglichkeiten

Das Ultraschallecho-Verfahren kann allgemein zur zerstörungsfreien Prüfung von Holzkonstruktionen wie Fachwerken, Holzbalkendecken und Dachstühlen angewendet werden. Damit ist auch eine Früherkennung und Eingrenzung von Schäden, eine Kostenabschätzung bei Instandsetzung und Dokumentation des Bauteilzustandes möglich. Entscheidende Vorteile des Verfahrens sind, dass nur eine einseitige Zugänglichkeit erforderlich ist und die Untersuchungen ungefährlich sind.

Integritätsprüfung

Mit dem Ultraschallecho-Verfahren kann der Bauteilzustand bei nur einer zugänglichen Oberfläche indirekt über das Echo der Schallwellen an der Rückwand bestimmt werden. Wird das Rückwandsignal abgeschattet kann durch eine genauere Untersuchung der Schallsignale ein früheres Echo an einem Schwindriss oder Holzdübel bestimmt werden. Auch ein Riss in einem Brettschichtholzbinder kann direkt detektiert werden, und zwar durch Echos die eine kürzere Laufzeit als das Rückwandecho haben.

Kommt es bei sonst gleichbleibenden Bedingungen zu einer Abschattung der Rückwand sind weitere Untersuchungen erforderlich. Schäden durch Fäulnis zeigen sich durch eine langsame Abschattung des Rückwandsignals.

Bauteilabmessungen und Minderdicken

Es ist auch möglich, mit dem Ultraschallecho-Verfahren. Aussparungen z. B. bei Stützen mit einer Lage senkrecht und parallel zur Tragrichtung zu detektieren. Von praktischer Bedeutung ist dies beispielsweise für die Ortung von Minderdicken, Ausklinkungen, Balkenstößen und der Bestimmung dieser Abmessungen.

10.3 Grenzen der Verfahren

Für eine sinnvolle und sichere Anwendung eines Verfahrens ist es auch wichtig, die Grenzen des Verfahrens zu kennen. Folgend wird auf die Grenzen der Ultraschall- und Röntgentechnik eingegangen.

Materialuntersuchungen mit Ultraschall können nur durchgeführt werden, wenn eine direkte Ankopplung möglich ist. Ist dies durch bauliche Gegebenheiten wie z. B. durch Parkett und Stuck bei einem Deckenbalken nicht möglich, kann keine Messung erfolgen. Ist die Messoberfläche verfault (Würfelbruch), oder aufgelöst, ist keine Messung mit Ultraschall möglich. In diesen Fällen müssen Untersuchungen mit Röntgen oder Bohrwiderstand zu Hilfe gezogen werden. Ein weiterer Fall, wo eine Ankopplung unmöglich ist, ist eine sehr unebene Rinde von Bäumen. Hier konnten als Ersatz die Untersuchungen mit Röntgen, Schalltomographie und SIP durchgeführt werden. Dies kann aber auch trotz einer denkbaren direkten Ankopplung durch eine verfaulte (Würfelbruch) oder aufgefaserter Oberfläche nötig sein.

Auch bei einer optimalen Ankopplung kann eine Untersuchung des Bauteils durch einen breiten oberflächennahen Riss oder Insektenschaden parallel zur Oberfläche unmöglich sein, da es an dem Riss verfahrensbedingt zu einer Totalreflexion kommt und der Bereich unter dem Riss nicht mehr untersucht werden kann.

Eine völlige Abschattung der Rückwand durch diffuse Vielfachreflexionen können durch einen oberflächennahen Insektenschaden ausgelöst werden, der eine Untersuchung des Balkens durch die vielen kleinen Streuer auch unmöglich macht. In diesen Fällen kann auch mit zerstörungsarmen Verfahren oder Durchstrahlung die Untersuchung des Bauteils fortgesetzt werden.

Messungen mit der Röntgentechnik ergaben, dass Wasser die Strahlung stark absorbiert. So kann feuchtes, geschädigtes Holz mit ungeschädigtem Holz großer Dichte verwechselt werden. Mit der Hochpassfilterung der Röntgenbilder wird die Jahrringstruktur des Holzes dargestellt und eine Schädigung kann über die intakte Struktur ausgeschlossen werden. Da diese deutliche Struktur geschädigte Bereiche überdecken kann, sollte ein Bauteil immer aus unterschiedlichen Richtungen durchstrahlt werden.

10.4 Ausblick

Nach den umfangreichen Messungen mit Ultraschallecho an der BAM an trockenen Probekörpern mit wenigen Rissen und an ausgebauten Bauteilen sowie diversen Messungen an Bauteilen in Bauwerken sollten noch weitere Versuche an Bauteilen mit Fäulnisschäden unterschiedlichen Schweregrades durchgeführt werden.

Die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit ergaben, dass die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Holz Anatomie bei Transversalwellen sehr viel geringer ist als bei Longitudinalwellen. Dies bedeutet, dass bei Transversalwellen in den unterschiedlichen anatomischen Richtungen von Holz wie bei Beton die gleichen Geschwindigkeiten herrschen. So ist es auch bei Holz möglich, die Laufzeitkorrigierte Überlagerung und SAFT anzuwenden. Mit diesen Verfahren wird bei Beton das Kornrauschen durch eine statistische Überlagerung der Signale reduziert. Übertragen auf Holz kann es auch hier zu besseren

Ergebnissen führen. Die ersten Versuche mit Laufzeitkorrigierter Überlagerung und SAFT lassen eine Anwendung an Bauteilen mit großen Abmessungen als sinnvoll erscheinen.

Weiter liegen noch erhebliche Potentiale in einer benutzerfreundlicheren Signalauswertung des Handgerätes A1220, da bisher die Signale nur als Einhüllende darstellbar waren.

Weiter sollte der Einfluss von Insektenschäden auf die Ultraschallmessungen weiter untersucht werden.

Nach ersten Erfolgen mit der mobilen, digitalen Radiographie mit der Blitzröhre kann hier mit noch empfindlicheren Detektoren und dem Mehrfachenergieverfahren untersucht werden, ob die Jahrringstrukturen in Bäumen noch besser aufgelöst werden können. Besonders die Auflösung der abgebildeten Jahrringe müsste so gesteigert werden, dass dendrochronologische Untersuchungen damit durchgeführt werden können.

Als Anwendungsmöglichkeiten der Fehlstellenortung mit der Ultraschallechotechnik kommt beispielsweise die Untersuchung an Holzbalkendecken und Dachstühlen, in der Denkmalpflege (Fachwerke, Kirchen, Speicher) und Messungen zur Früherkennung und Eingrenzung von Schäden und zur besseren Kostenabschätzung vor Instandsetzungen in Frage.

Mit der Entwicklung und Austestung der Ultraschallecho-Technik an Holz gelang es, der zerstörungsfreien Prüfung von Holz ein vielseitiges Verfahren zur Verfügung zu stellen. Wünschenswert wäre ein höherer Bekanntheitsgrad und eine Etablierung dieser neuartigen, interessanten Methode.

11 Literaturverzeichnis

- [ACSYS, 2005] Internetpräsenz der Firma Acoustic Control Systems (ACSYS), Moskau, RUS <http://www.acsys.ru/> (2005).
- [ADJANOHOUE, 1999] Adjanohou, G., Guillot, J.-L., Lanvin, J.-D. and R. Cholat: Small Roundwood Grading by Non Destructive X-Rays and Ultrasound Wave Methods. NDT.net, 4 (1999) 11.
- [AICHER, 2002] Aicher, S. and G. Dill-Langer: Einfluss der zylindrischen Anisotropie des Holzes und der Belastungsbedingungen auf die off-axis Steifigkeit und die Spannungen eines Brettquerschnitts bei Querschugbeanspruchung. Otto Graf Journal (2002).
- [ALOIA, 1999] Aloia, J. F., Ma, R., Vaswani, A. and M. Feuerman: Total-Body Calcium Estimated by Delayed Gamma Neutron Activation Analysis and Dual-Energy X-ray Absorptiometry. Osteoporos Int. 10 (1999) pp. 510 - 515.
- [ANTHONY, 1996] Anthony, R. W.: Nondestructive evaluation of timber pile length. NDT Conference, San Diego, USA, 20.-23.02.1996, pp.167-172.
- [ANTHONY, 2004] Anthony, R. W.: Use of Portable X-Ray Equipment to Investigate Historic Timber Structures, Prag, Tschechien 2004.
- [ARNDT, 2004] Arndt, R., Hillemeier, B., Maierhofer, Ch., Rieck C., Röllig, M., Scheel, H. und A. Walther: Zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen mit der Impuls-Thermografie. Bautechnik 81 (2004) 10, S.786-793.
- [BAM, 2005] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: Internetpräsenz ZfPBau-Kompodium. <http://www.bam.de/zfpbau-kompodium.htm> (2005).
- [BARTLOMIEJ, 1977] Bartlomiej, K. und W. Jerzy: Zusammenhang zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und den mechanischen Eigenschaften pilzbefallenen Holzes. Holz als Roh- und Werkstoff 35 (1977) S. 341-345
- [BEAL 1993 (1)] Beall, F. C. and J. M. Biernacki: Monitoring the adhesive curing process for parallel wood laminates. In: Proceedings, Second International Conference on Acousto-Ultrasonics, Atlanta. The American Society for Nondestructive Testing, Inc. (1993) pp. 163-169
- [BEAL 1993 (2)] Beall, F. C.: Overview of acousto-ultrasonics applied to wood and wood-based materials. In: Proceedings, Second International Conference on Acousto-Ultrasonics, Atlanta. The American Society for Nondestructive Testing, Inc. (1993) pp. 153-161
- [BECKER, 1993] Becker, G.: Verfahren der zerstörungsfreien Holzprüfung - Entwicklungstendenzen in Nordamerika und Folgerungen für die Anwendung in Mitteleuropa. Holz als Roh- und Werkstoff 51 (1993), S. 177-180.
- [BEKHTA 2002] Bekhta, P., Niemz, P. und L. J. Kucera: Untersuchungen zur einigen Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung in Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin 60 (2002) 1, S. 41-45

- [BERGLIND, 2000] Berglind, H. and A. Dillenz: Detection of Glue Deficiency in Laminated Wood with Thermography. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, Session VII.: Thermography, No. 49 (2000); NDT.net - March 2001, Vol. 6 No. 03.
- [BERGLIND, 2003] Berglind, H. and A. Dillenz: Detection glue deficiency in laminated wood – a thermography method comparison. NDT & E International 36 (2003) 6, pp. 395-399.
- [BERLINER ZEITUNG, 2004] Berliner Zeitung: Käferlarven fressen Dachstühle, Nr. 195, 21./22. August 2004, S. W1, Berlin.
- [BERNDT, 1996] Berndt H., Elastic waves in wood, modelling and measurement. PhD Dissertation. Univ. of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA (1996).
- [BERNDT, 2000] Berndt, H., Schniewind, A. and G. Johnson: Ultrasonic Energy Propagation Through Wood: Where, When, How Much. In: Proceedings of 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, Session I.: Sound- and Ultrasound, No. 6.
- [BERRYMAN, 1990] Berryman James G.: Lecture Notes on Nonlinear Inversion and Tomography 164 p 1990.
- [BFH, 1995] Bundesforschungsanstalt für Holz und Forstwirtschaft: Holz. Zentralblatt Nr 35 (1995) vom 22. Mai 1995.
- [BHUYAN 1997] Bhuyan, G. S.: NDE based grading and quality assurance of new and old utility wood poles. Trends in NDE Science and Technology. In: Proceedings of the 14th World Conference on NDT (14th WCNDT), Dec 8-13, 1996, New Delhi, India, No. 2 (1996) pp. 747-750
- [BIAGI, 1995] Biagi, E., Gatteschi, G., Masotti, L., Zanini, A.: High resolution ultrasonic images for defect detection in wood. Acoustical Imaging. 21st International Symposium on Acoustical Imaging, Laguna Beach, USA, March 28-30, 1994, No. 21 (1995) New York: Plenum Press, pp. 675-681.
- [BIERNACKI 1996] Biernacki, J.M. and F. C. Beall: Acoustic monitoring of cold-setting adhesive curing in wood laminates: effect of clamping pressure and detection of defective bonds. Wood and Fiber Science. (1996) 28, pp. 1, 7-14, 7 ref.
- [BLAICH, 1999] Blaich, J.: Bauschäden: Analyse und Vermeidung. Stuttgart: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt - EMPA (1999).
- [BOOKER 2000] Booker, R. E., Ridoutt, B. G., Wealleans, K. R., McConchie, D. L. and R. D. Ball: Evaluation of tools to measure sound velocity and stiffness of green radiata pine logs. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood University of Western Hungary, 13-15 September 2000, Sopron (2000) pp. 223-231
- [BOZHANG, 1996] Bozhang, S. and R. F. Pellerin: Nondestructive evaluation of the degree of deterioration in wood: stress wave frequency spectrum analysis. In: Sandoz, J. L. (ed.); Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing

- of Wood, Lausanne, CH, Aug 26-28, 1996, Swiss Federal Institute of Technology Chair of Timber Construction, Sessoin 3: Stress Wave Methods, pp. 99-116.
- [BRANCHERIAU, 2002] Brancheriau, L., Bailleres, H. and J.-D. Lanvin: A New Grading Process for Structural Timber Based on Partial Least Squares Method Using Acoustic Vibrations Spectra. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, pp. 265-272.
- [BUCUR 1995] Bucur, V.: Acoustics of Wood. CRC Press (1995)
- [BUCUR, 1996] Bucur, V.: Acoustics of Wood as a Tool for Nondestructive Testing. In: Sandoz, J. L. (ed.); Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne, CH, Aug 26-28, 1996, Swiss Federal Institute of Technology Chair of Timber Construction, Session 2: Ultrasonic Based Methods, pp. 53-60.
- [BUCUR, 1998] Bucur, V. and P. Rasolofosaon: Dynamic elastic anisotropy and nonlinearity in wood and rock. Ultrasonics 36 (1998) pp. 813-824.
- [BUCUR, 1999] Bucur, V.: Acoustics as a Tool for Nondestructive Testing of Wood. In: Proceedings of NDTISS`99 International Symposium on NDT Contribution to the Infrastructure Safety Systems, 22-26 November 1999, Torres, RS Brazil, V7.
- [BUCUR, 2002 (1)] Bucur, V. and H. Berndt: Ultrasonic Energy Flux Deviation and Off-Diagonal Elastic Constants of Wood. In: Beall, F. C. (ed.); Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 19. - 21. August 2002, University of California, Berkeley Campus, California, USA, pp. 273.
- [BUCUR, 2002 (2)] Bucur, V., Lancelleur, P. and B. Roge: Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces. Ultrasonics 40 (2002) pp. 537-541.
- [BUCUR, 2002 (3)] Bucur, V.: Propagation and Polarization of Ultrasonic Waves in Wood. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, 24.-28.06.2002, Berlin, DGZfP-Berichtsband auf CD, Berlin (2002).
- [BUCUR, 2005] Bucur, V. mündliche Mitteilung während des 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hannover (2005)
- [BURMESTER 1967] Burmester, A.: Nachweis von Ästen im Kiefernholz durch Ultraschall. Holz als Roh- und Werkstoff 25 (1967) 4, S. 157-163
- [CATENA, 2002] Catena, A.: Thermographie shows Damage Cavities Present in Trees. Nondestructive Characterization of Materials XI, Berlin 2002, Springer, pp. 515-522.
- [CESAREO, 2000] Cesareo, R., Brunetti, A., Cappio Borlino, C., Mascarenhas, S., Robert, R. and A. Castellano: X and g-RAY Tomography for the study of works of art. NDT.net 5 (2000) 1.
- [COFFEL 1996] Coffel, D., Martin, P. and P. Gross: Non-destructive testing methods on solid timber: Microwaves, ultrasounds and spectrometry. In: Proceedings of the Internat. Conference of Progress in Forest Products Research, Sep 19-22, 1995, Göttingen, D (1995) pp. 86-89

- [COLLING, 2000] Colling, F.: Lernen aus Schäden im Holzbau. Ursachen, Vermeidung, Beispiele. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, Bruderverlag, 459 Seiten.
- [COMBE 1997] Combe, J.: Bestimmung der Holzqualität mit Ultraschall. AFZ/Der Wald 52 (1997) 3, S. 135-137
- [CRAMER, 1993] Cramer, J.: Handbuch der Bauaufnahme - Aufmaß und Befund. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt (1993), 2. Auflage.
- [DANVIND, 2004] Danvind J. and T. Moren: Using X-ray CT-scanning for moisture and displacement measurement in knots and their surroundings. In: Proceedings of the 5th European COST E15 Conference on wood drying: Timber drying for value-added products , 22-24 April 2004 at NAGREF/Forest Research Institute, Athens, Greece, pp. 186-195.
- [DEPPE, 1993] Deppe, H.-J. und H. Rühl: Zur Beurteilung alter Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff, 51 (1993) S. 379-383.
- [DEUTSCH, 1997] Deutsch V., Platte M., Vogt M.: Ultraschallprüfung. Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag 372 S. (1997).
- [DGZFP 2004] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Ausbildung DR Digitale Radioskopie, www.dgzfp.de (2004)
- [DGZFP, 1999] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZFP): Merkblatt für Ultraschall-Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile (B4). Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (1999).
- [DIEBOLD 2000] Diebold R., Schleifer A. and P. Glos: Machine Grading of Structural Sawn Timber from Various Softwood and Hardwood Species. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood University of Western Hungary, 13-15 September 2000, Sopron (2000) pp. 139-146
- [DILL-LANGER, 2002] Dill-Langer, G Rigger T, Höfflin L., Aicher S.: Location of Acoustic Emission Sources in Timber Loaded Parallel to Grain In: Beall, F. C. (ed.); Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 19. - 21. August 2002, University of California, Berkeley Campus, California, USA.
- [DILL-LANGER, 2005] Dill-Langer G. mündliche Mitteilung während des 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hannover (2005)
- [DIVOS, 2002] Divos, F. and L. Szalai: Tree evaluation by Acoustic Tomography. In: Beall, F. C. (ed.); Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 19. - 21. August 2002, University of California, Berkeley Campus, California, USA.
- [DUBBEL, 1999] Dubbel, V., Weihs, U., Krummheuer, F. und A. Just: Die elektrische Widerstandstomographie - Neue Methode zur zweidimensionalen Darstellung von Fäulen an Fichte. AFZ/Der Wald 26 (1999) S.1422-1424.
- [DZIRZON, 1990] Dzierzon, M. und J. Zull: Altbauten zerstörungsarm untersuchen. Bauaufnahme, Holzuntersuchungen, Mauerfeuchtigkeit. Verlag R. Müller (1990).

- [ECKSTEIN, 1994] Eckstein, D. und U. Saß: Bohrwiderstandsmessung an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation. Holz als Roh- und Werkstoff 52 (1994), S. 279-286.
- [EGH, 1987] Entwicklungsgemeinschaft Holz: Beurteilungskriterien für Rissbildungen bei Bauholz im konstruktiven Holzbau. Sonderdruck aus bauen mit holz (1987) 9, Karlsruhe: Burdervelag.
- [EHLBECK, 1990] Ehlbeck, J. und R. Görlacher: Zur Problematik bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz. Bauen mit Holz (1990) 2, S. 117-121.
- [ENGLER, 1990] Engler, P. and W. D. Friedman: Review of Dual-Energy Computed Tomography Techniques, Materials Evaluation 48 (1990) pp. 623-629.
- [ERLER 1998] Erler, K.: Korrosion von Vollholz und Brettschichtholz. Bautechnik 75 (1998) 8, S. 530-538
- [ERLER, 1993] Erler, K.: Korrosion von Vollholz und Brettschichtholz. Bautechnik 75 (1998), H 8, S. 530-538.
- [ERNST 2004] Ernst Hardy: Experimentelle Verifizierung von Modellvorstellungen zur Schallausbreitung in anisotropen Materialien. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation (2004)
- [FEENEY 1996] Feeney, F. E., Chivers, R. C., Evertsen, J. A. and J. Keating: The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood. In: Proceedings of NDT 1996, 10th Int. Symp. on Nondestructive Testing of Wood, Aug 26-28, 1996, Lausanne, CH (1996) pp. 73-81
- [FEENEY, 1996] Feeney, F. E., Chivers, R.C., Evertsen, J. A. and J. Keating: The influence of inhomogeneity on the propagation of ultrasound in wood. In: Sandoz, J. L. (ed.); Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne, CH, Aug 26-28, 1996, Swiss Federal Institute of Technology Chair of Timber Construction, Sessoin 2: Ultrasonic Based Methods, pp. 73-82.
- [FOKUS, 2004] Internetpräsenz www.fokus-GmbH-Leipzig.de
- [FRANKE, 2005] Franke, B., Franke, S. und K. Rautenstrauch: Beanspruchungsanalyse von Holzbauteilen durch 2D-Photogrammetrie. Bautechnik 82 (2005) Berlin: Ernst und Sohn.
- [GEHRI 1995] Gheri, E.: Sortieren mittels Ultraschallverfahren. In: Berichtsband der Grazer Holzbaufachtagung, 22. Juni 1995, Seite C/1-1 bis C/1-9
- [GERNER, 1980] Gerner, M.: Infrarottechnik Fachwerkfreilegung. Stuttgart: Deutsche Verlag Anstalt (1980).
- [GIER, 2001] Gier, J. und P. Niemz: Untersuchung zum Einfluss von Ästen auf die Eigenschwingung von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 59 (2001), S. 472-474.
- [GLINSKI, 1991] Glinski, W.: Grundstufe Holztechnik-Technologie. Hamburg: Verlag Handwerk und Technik (1991) 5. Auflage.
- [GLOS 1989, 1] Glos, P.: Festigkeit von Fichten-Bauholz mit Insekten und Pilzbefall, Biegefestigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff 47 (1989) S. 329-335

- [GLOS 1989, 2] Glos, P.: Festigkeit von Fichten-Bauholz mit Insekten und Pilzbefall, Druck und Zugfestigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff 47 (1989) S. 365-371
- [GLOS, 2002] Glos, P.: Institut für Holzforschung der Technischen Universität München (2002), mündliche Mitteilung
- [GOECKE, 2005] mündliche Mitteilung Ingenieurbüro Argus Elektronik
- [GONCALVES, 2005] Gonclaves R., Costa O. A. L.: Variation in ultrasonic wave velocity and stiffness terms of the diagonal matrix with moisture content for tree species of brazilian wood. In: Proceedings of 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 02.-04.05.05, Hannover.
- [GÖRLACHER 1991] Görlacher, R.: Bestimmung des Elastizitätsmoduls. Bauen mit Holz (1991) 8, S. 582-587
- [GÖRLACHER, 1987] Görlacher, R.: Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein „in situ“ - Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte. Holz als Roh- und Werkstoff 45 (1987), S. 273-278.
- [GÖRLACHER, 1990 (1)] Görlacher, R. und R. Hättrich: Die Bohrwiderstandsmessung. Bauen mit Holz (1990) 6, S. 455-459.
- [GÖRLACHER, 1990 (2)] Görlacher, R.: Die Ausziehwerstandsmessung, Untersuchung von altem Konstruktionsholz. Bauen mit Holz (1990) 12, S. 904-908.
- [GRECON, 2004] Internetpräsenz GreCon, Produktbeschreibung: <http://www.grecon.de/> (2004).
- [GRIMBERG, 2000] Grimberg, R., Savin, A., Lupu, A. and C. Rotundu: A method to determine debonding zones in multilayers wood materials. In: Proceedings 15th of the World Conference on Nondestructive Testing Roma (Italy), 15-21 October 2000.
- [GUTERMANN, 2003] Gutermann, M., Slowik, V. and K. Steffens: Experimental Safety Evaluation of Concrete and Masonry Bridges. In: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, V69, Berlin (2003)
- [GUZENDA, 2001] Guzenda, R., Olek, W. and H. Baranowska: Identification of Free and Bound water Content in wood by means of NMR Relaxometry. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, Session IV.: Gamma ray, No. 32 (2000); NDT.net - March 2001, Vol. 6 No. 03.
- [HABERMEHL, 1992] Habermehl, A. und H.-W. Ridder: Methodik der Computer-Tomographie zur zerstörungsfreien Untersuchung des Holzkörpers von stehenden Bäumen. Holz als Roh- und Werkstoff 50 (1992) S. 465-474.
- [HABERMEHL, 1993] Habermehl, A. und H.-W. Ridder: Anwendung der mobilen Computer-Tomographie zur zerstörungsfreien Untersuchung des Holzkörpers von stehenden Bäumen. Holz als Roh- und Werkstoff 51 (1993) S. 101-106.
- [HABERMEHL, 1996] Habermehl A. und H.-W. Ridder: Computer –Tomographie in der Forstwirtschaft und Baumpflege. DGZfP-Zeitung 55 (1996) 12.

- [HAGREY 2004] Hagrey, S. A. al and R. Meissner: Botanical problems studied by applied geophysics. Mitteilungen, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, DGG (German Geophysical Society), 2/2004, 2-8
- [HAKEN, 1990] Haken, H. und H. C. Wolf: Atom- und Quantenphysik. Berlin: Springer Verlag (1990) 4. Auflage.
- [HALABE, 1994] Halabe, U., GangaRao, H. and R. Hota: Nondestructive evaluation of wood using ultrasonic time and frequency domain analysis. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. In: Proceedings of the 13th Symposium, Brunswick, USA, 1.8.- 6.8.1993, No. 13B (1994) New York: Plenum Press, pp. 2155-2160.
- [HALABE, 1995] Halabe, U. B. and H. GangaRao: Nondestructive evaluation of wood using ultrasonic frequency domain analysis. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Proceedings of the Twenty-First Symposium, Snowmass Village, USA, 31.7.-5.8.1994, No. 14B (1995) New York: Plenum Press, pp. 1653-1660.
- [HALABE, 1996] Halabe, U., GangaRao, H., Samer, P. and H. Veerabhadera: Assessment of defects and mechanical properties of wood members using ultrasonic frequency analysis. Materials Evaluation 54 (1996) 2, pp. 314-322.
- [HALABE, 1999] Halabe, U. and R. Franklin: Detection of flaws in structural members using spectral analysis of ultrasonic signals. Nondestructive Testing and Evaluation, 15 (1999) 3/4, pp. 215-236.
- [HALASZ, 1986] Halasz, R. und C. Scheer: Holzbau-Taschenbuch, Architekturtechnische Wissenschaften Berlin (1986).
- [HAN, 1996] Han, W.: Log quality evaluation by lenthwise ultrasonic transmission. Holz als Roh- und Werkstoff 54 (1996) S. 7-10.
- [HAUFFE 2001] Hauffe, P. and G. Mahler: Evaluation of internal log quality using X-ray and ultrasound, In: Proceedings of 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000
- [HAUFFE, 2001] Hauffe, P. and G. Mahler: Evaluation of internal log quality using X-ray and Ultrasound. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, Session II.: Strength and MOE, No. 30 (2000).
- [HEIDGER, 2003] Heidger, C mündliche Mitteilung, Ingenieurbüro (2003).
- [HEIDGER, 2004] Heidger, C. www.art-ray.com, (2004).
- [HILLGER, 2004] Hillger, W., Ahrholdt, M., Rohling H., Henrich R.: Non-Contact Ultrasonic Imaging Techniques for Composite Components, 16th World Conference on NDT, 30.08.-03.09. 2004, Montréal, Canada, Conf. Proc. on CD Vol. 9 No.11.
- [HOB OHM 1996] Hobohm, M., Tobisch, M. and Fröhlich: A new algorithm of utilization of acoustic emission for the judgement of stressed timber. In: Proceeding of the 1996 International Conference on Wood Mechanics. FMPA-Otto-Graf-Institut Stuttgart (1996) pp. 599-614

- [HOBOHM 1998] Hobohm, M. und M. Tobisch: Zum Thema „Bauholz zerstörungsfrei auf Eignung prüfen“. Holz – Zentralblatt 124. Jahrgang Nr. 100 (1998) S. 1353
- [HOBOHM, 1996] Hobohm, M., Tobisch, S. and K.-J. Fröhlich: A new algorithm of utilization of accoustic emission for the judgement of stressed timber. Tagungsband: Proceeding of the 1996 international conference on wood mechanics. Stuttgart: FMPA-Otto-Graf-Institut (1996) pp. 599-614.
- [HUANG 1993] Huang, Y. S., Chen, S. S. and S. C. Chi: Feasibility of the evaluation of log quality by using nondestructive test method. Bulletin-of-the-Taiwan-Forestry-Research-Institute (1993) 8, pp. 1, 85-98, 13 ref.
- [HUANG 2000] Huang, C. L.: Predicting lumber stiffness of standing trees. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood University of Western Hungary, 13-15 September 2000, Sopron (2000) pp. 173-179
- [ILLERHAUS, 1995] Illerhaus, B.: Fortschritte in der Computertomographie. Restauro, Heft 5 (1995).
- [IML, 2004] Internetpräsentation IML Instrumenta Mechanik Labor GmbH, D-69168 Wiesloch <http://www.iml.de/> (2004).
- [INFRATEC, 2001] Internetpräsenz InfraTec GmbH <http://www.InfraTec.de>.
- [INNOVATIVE-VISION, 2004] www.innovative-vision.com (2004).
- [JAYAKUMAR, 2003] Jayakumar, T. K. and R. Nindie: Evaluations of Concrete and Wood by UVP Methods. In: Proceedings of National Seminar on Non-Destructive Evaluation, 11-13 December 2003, pp.85-89.
- [JOANNEUM, 2005] Internetpräsenz <http://www.joanneum.at/>, Schnittoptimierung durch optoelektronische Holzsortierung (2005).
- [JONAS, 1997] Jonas M.: Einsatzmöglichkeiten der Ultraschallfrequenz-Analyse für die zerstörungsfreie Prüfung von mineralischen Baustoffen und Bauteilen. Dissertation, Universität Dortmund, (1997)
- [JORDAN, 1998] Jordan, R., Feeney, F., Nesbitt, N. and J. A. Evertsen: Classification of wood species by neural network analysis of ultrasound signals. Ultrasonics 36 (1998) pp. 219-222.
- [JUNG, 1981] Jung, W.: Das Abiturwissen Physik. Frankfurt/Main: Fischer Verlag (1981).
- [KABIR 1998] Kabir, M. F., Daud, W. M., Khalid, K. and H. A. A. Sidek: Dialactic and ultrasonic properties of rubberwood. Effect of moisture content, gain direction and frequency. Holz als Roh- und Werkstoff 56 (1998) S. 223-227
- [KABIR 2002] Kabir Firoz M., Araman Philip A.: Nondestructive evaluation of defects in wood pallet parts by ultrasonic scanning. Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 19. - 21. August 2002, University of California, Berkeley Campus, California, USA, 203-208.
- [KANDA, 1998] Kanda, S., Shioya, K., Yanagiya, Y., Tamura, Y. and K. Adachi: Ultrasonic TOF-CT system for wooden pillars. In: Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium 1998, Sendai, Japan, October 5-8, 1998, Vol. 1, pp. 743-746.

- [KANG 2002] Kang, H.Y. and R. E. Booker: The characterisation of ultrasonic stress wave transmitted through wood during drying. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 19. - 21. August 2002, University of California, Berkeley Campus, California, USA, pp 209-212
- [KEMPE, 1999] Kempe, K.: Dokumentation Holzschädlinge. Holzzerstörende Pilze und Insekten an Bauholz. Berlin: Verlag Bauwesen (1999) 168 Seiten.
- [KESSEL 1989] Kessel, M. H. und J. L. Sandoz: Zur Effizienz der Festigkeitssortierung von Fichtenkantholz, Einfluß der Klassengrenzen der Sortierparameter. Holz als Roh- und Werkstoff 47 (1989), S. 323-327
- [KHALID 1999, 2] Khalid, A. and V. C. Kearley: Using a low frequency ultrasonic technique to predict the modulus of rupture and presence of decay in wooden transmission poles. In: Proceedings of NDT'99 and UK Corrosion '99, 14-16 September 1999, Poole, GB (1999) pp. 105-110
- [KHALID 1999,1] Khalid, A.: Low-frequency ultrasonics for monitoring the condition of wooden transmission poles. Insight 41 (1999) 7, pp. 453-465
- [KHARADLY, 1985] Kharadly, M.: Microwave diagnostic for stress-rating of dimension lumber. In: Proceeding of the 5th Nondestructive Testing of Wood Symposium, September 9-11, 1985 Washington State University, Pullman, WA, pp. 445-464.
- [KLETT, 1991] Klett, B.: Grundlagenuntersuchungen von bildgebenden zerstörungsfreien Diagnoseverfahren für Holz und Holzwerkstoffe. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Technische Universität Dresden (1991).
- [KLINGSCH 1989] Klingsch, W. und U. Neum: Zerstörungsfreie Lokalisierung äußerlich nicht sichtbarer Holzschädigungen mittels Ultraschall. Bauen mit Holz (1989) 6, S. 421-423
- [KNIGGE, 1966] Knigge, W. und H. Schulz: Grundriss der Forstbenutzung. Berlin/Hamburg: Parey - Verlag (1966).
- [KOLLMANN, 1951] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin: Springer Verlag (1951) 2. Auflage.
- [KOTHE 1998] Kothe, E.: Auswirkung von Holzschäden durch Pilze und Insekten auf die Standsicherheit von Holzbauwerken - eine Bestandsaufnahme. Bautechnik 75 (1998) 8, S. 552-558
- [KOTHE, 1987] Kothe, E.: Moderne, zerstörungssarme Prüfmethode zur Bestimmung der Eigenschaften verbauten Holzes. Bauforschung Baupraxis (1987) 102.
- [KRAUSE, 1999] Krause M., Mielentz, Milman, Wiggerhauser, Müller: Spannkanaluntersuchung mit bildgebenden Ultraschallecho-Verfahren. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berichtsband 66-CD: Plakat 2 (1999)
- [KRAUSE, 2001] Krause M., Mielentz, Milman, Wiggerhauser, Müller, Schmitz: Ultrasonic image of concrete members using an array system. NDT & E International 34 (6) (2001) pp. 403-408
- [KRAUTKRÄMER, 1986] Krautkrämer, J. und H. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin: Springer Verlag (1986) 5. Auflage.

- [KROGGEL, 2005] Kroggel, O., Krause, M., Schickert, M. und K. Langenberg, K Moderne Verfahren der Bauwerksdiagnose, Entwicklung und Anwendung - Ultraschall in: Tagungsunterlagen zur Fachtagung 2005 des DAfStb, Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Bauwerksdiagnose im Betonbau 10./11. März 2005, Berlin, (2005).
- [KRUSCHWITZ, 2005] Kruschwitz, S., Niederleithinger, E. und T. Martin: Spektrale Induzierte Polarisation zur Charakterisierung von Baumaterial. In: Proceedings zur Jahrestagung Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG), Graz, 21.-25.02.2005, Posterbeitrag, S. 296-297.
- [KRUSE 1996] Kruse, K., Broker, F. W. and A. Fruhwald: Interrelation between internal bond, density distribution and ultrasonic velocity of particleboard. Zusammenhang zwischen Querzugfestigkeit, Rohdichteprofil und Ultraschallgeschwindigkeit von Spanplatten. Holz als Roh und Werkstoff (1996) 54, S. 5, 295-300, 26 ref.
- [KUCERA 1998] Kucera, L. M., Niemz, P. und A. Fliesch: Vergleichende Messung zur Ermittlung der Eigenschaften von Fichtenholz mittels Eigenfrequenz und Schallgeschwindigkeit. Holzforschung und Holzverwertung 5 (1998) S. 96-99
- [KUCHLING, 1996] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag (1996), 16. Auflage.
- [KUDRNOVSKI 1992] Kudrnovski, I. und M. Moix: Ultraschall garantiert Sicherheit, Neue Chancen für den Holzbau. Schweizer Ingenieur und Architekt (1992) 22, S. 457-459
- [LADJAREVIC, 1996] Ladjarevic, M. und M. Goldschneider: Bestimmung der Länge historischer Holzpfähle mit einer Hammerschlagmethode. Bautechnik 73 (1996) 6, Berlin: Verlag Ernst und Sohn.
- [LASSOE, 1997] Lasso, T. und A. del Conte: Der neue BLV Pilzatlant. München: BLV Verlagsgesellschaft mbH (1997).
- [LEHMANN, 2001] Lehmann, E., Vontobel, P., Scherrer, P. und P. Niemz: Anwendung der Methode der Neutronenradiographie zur Analyse von Holzeigenschaften. Holz als Roh- und Werkstoff 59 (2001) S. 465-471.
- [LEMASTER 1995] Lemaster, R.-L. and W.-W. Wilcox: The use of acousto-ultrasonics to detect decay in wood-based products. In: Proceedings of the Second International Conference on Acousto-Ultrasonics. Acousto-Ultrasonic Materials Characterization, Atlanta, USA, June 24-25, 1993, Columbus: American Soc. for Nondestructive Testing (ASNT) (1993) pp. 181-190
- [LEMASTER, 1985] Lemaster, R. L. and D. A. Dornfeld: Monitoring the wood cutting process with acoustic emission. Journal of Acoustic Emission 4 (1985) 2/3, pp. 228-231.
- [LESCHNIK, 2004] Leschnik W. und C. Gustmann: Feuchtemessung an Holz mit Mikrowellen. In: Tagungsband Feuchtetag 2004, DGZfP-Berichtsband 91 auf CD.
- [LISTER, 2004] Lister, P.: Applications of X-Ray Computed Tomography in the Wood Products Industry. In: Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing, 30.08. - 03.09.2004, Montreal, CDN, Proceedings on CD-ROM.

- [LOUNG, 2004] Loung, M. P.: Mechanical performance of wood construction materials. In: Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing, 30.08. - 03.09.2004, Montreal, CDN, Proceedings on CD-ROM.
- [LUTZ, 2004] Lutz J., Kroggel O.: Ultrasonic Inspection Of Wooden Constructional Elements Darmstadt Concrete, Annual Journal on Concrete and Concrete Structures. Darmstadt: Institut für Massivbau, TU Darmstadt, 2001. Vol. 19, (2004)
- [MACHADO 2003] Machado, S. J., Costa, D. and H. Cruz: Evaluation of Pine timber strength by drilling and ultrasonic testing. In: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, Berlin (2003)
- [MARTIN 2001] Martin, P. and J. Berger: Waves in wood: free vibrations of a wooden pole. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 49 (2001) p. 1155-1178
- [MARTIN, 2001] Martin, P. and J. Berger: Waves in wood: free vibrations of a wooden pole. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 49 (2001) pp. 1155-1178.
- [MATTHIES, 1998] Matthies, K.: Dickenmessung mit Ultraschall. Berlin: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DSV-Verlag (1998), 2. Auflage.
- [MAYERHOFER, 2004] Mayerhofer C. mündliche Mitteilung, BAM, (2004).
- [MILLER, 1990] Miller, W. F. and J. A. Doolittle: The Application of ground –penetrating radar to detection of internal defect in standing trees. In: Proceeding of the 7th Nondestructive Testing of Wood Symposium, September 27-29, 1989, Madison, WI, Washington State University, pp. 263-274 (1990).
- [MISHIRO 1996] Mishiro, A.: Effect of density on ultrasonic velocity in wood. Mokuzai-Gakkaishi, Journal of the Japan Wood Research Society (1996) 42, pp. 9, 887-894, 10 ref.
- [MÖNK, 1999] Mönk, W.: Schäden an Holzkonstruktionen. Berlin: Verlag Bauwesen (1999) 3. Auflage.
- [MÜLLER, 2001] Müller, U., Bammer, R., Hamschlag E., Stollenberger R. and R. Wimmer: Detection of fungal wood decay using Magnetic Resonance Imaging. Holz als Roh- und Werkstoff, 59 (2001) S. 190-194.
- [MULLER, 2003] Muller, W.: Timber Girder Inspection Using Ground Penetrating Radar. In: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, V 91, Berlin (2003)
- [MUSGAVE, 1970] Musgave M.J.P., Crystal acoustics. San Francisco, CA: Holden-Day 1970.
- [NESTLER, 2000] Nestler, R. und K.-H. Franke: Realisierung eines multisensorischen Ansatzes zur Oberflächeninspektion von Holz. In: Proceedings 6. Workshop Farbbildverarbeitung, 05.06. Oktober 2000, Berlin.

- [NEUMANN, 1995] Neumann, E. u.a.: Ultraschallprüfung von austenitischen Plattierungen, Mischnähten und austenitischen Schweißnähten. Theorie und Praxis Regelwerk. Renningen Malmshem: expert Verlag (1995) 340 Seiten.
- [NICOLAUS, 2003] Nicolaus, K.: DuMonts Handbuch der Gemäldekunde. Köln: DuMonts Literatur und Kunstverlag (2003).
- [NICOLETTI, 2003] Nicoletti, G., Socco, L., Martinis, R., Godio, A. and L. Sambuelli: Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. JOURNAL OF ARBORICULTURE, Vol. 29 (2003) 2, pp.66-78.
- [NIEMZ 1995,1] Niemz, P. und C. L. Valdivia: Entwicklungen in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Ihre Bedeutung bei Untersuchungen von Holz und Holzwerkstoffen, Teil 1, Holz Zentralblatt. Unabhängiges Organ für die Forst und Holzwirtschaft, 121 (1995) 71/72, S. 1181-1182
- [NIEMZ 1995,2] Niemz, P. und M. Reuter: Versuche zur Qualitätssortierung chilenischer Radiata-Kiefer. Holz Zentralblatt. Unabhängiges Organ für die Forst und Holzwirtschaft, 121 (1995) 100/101, S. 1553, 1554, 1563
- [NIEMZ 2001] Niemz Peter: Innere Defekte von Bäumen mit Schall bestimmen, Holz. Zentralblatt Nr 12 (2001) vom 26.1. 2001.
- [NIEMZ, 1992] Niemz, P. und A. Lühmann: Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, 50 (1992), S.191-194.
- [NIEMZ, 1993] Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echerdingen: DRW-Verlag Weinbrenner und Co. (1993).
- [NIEMZ, 1994] Niemz, P., Emmeler, R., Fröhlich, J., Pridöhl, E. und A. Lühmann: Vergleichende Untersuchungen zur Anwendung von piezoelektrischen und Schallemissionssignalen bei der Trocknung von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, 52 (1994) S.162-168.
- [NIEMZ, 1999] Niemz, P., Kucera, L. J. und G. Bernatowicz: Untersuchung zum Einfluß des Faserwinkels auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1999) S. 225-226.
- [NIEMZ, 2002] Niemz, P., Kucera, L. J., Haller, P. und M. Koban: Experimentelle Untersuchung zur Schallausbreitung in Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, 60 (2002) S. 46-47.
- [NIEMZ, 2003] Niemz, P. und W. Sonderegger W.: Untersuchung zur Korrelation ausgewählter Holzeigenschaften untereinander und mit der Rohdichte unter Verwendung von 103 Holzarten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 154 (2003) 12, S. 489-493.
- [NOGUCHI, 1992] Noguchi, M., Ishii, R., Fujii, Y. and Y. Imamura: Acoustive emission monitoring during partial compression to delete early stages of decay. Wood Science Technology 26 (1992) pp. 279-287.
- [NOLET, 1987] Nolet Guust: Seismic Tomography with Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics, 400 p. 1987.

- [OLIVITO 1996] Olivito, R. S.: Ultrasonic measurements in wood. *Materials Evaluation*, 4 (1996) pp. 514-517
- [ONSITEFORMASONRY2005]
- [OSTERLOH, 2003] Osterloh, K., Zscherpel, U., Ewert, U. und P. Weiss: Einsatzmöglichkeiten mobiler Röntgenblitzröhren, In: *Proceedings DGZfP-Jahrestagung*, 26.-28. Mai 2003 in Mainz, DGZfP-Berichtsband auf CD, Plakat 8, Berlin (2003).
- [OSTERLOH, 2005] mündliche Mitteilung, Dr. Osterloh BAM Berlin (2005)
- [OTTER, 1998] Otter, G. und R. Honecker: *Atome-Moleküle-Kerne*. Band 1 *Atomphysik*. Stuttgart: Teubner Verlag (1998) 2. Auflage.
- [PALAIA PEREZ 2000] Palaia Perez, L., Galvan Llopis, V., Cervera Moreno, F., Molina Nieto, R.: NDT determination of the strength loss of deteriorated wood, by using ultrasonic techniques and a specific wood tester. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, No. 52 (2000); pp. 327-336.
- [PICUS, 2005] Internetpräsenz <http://www.argus-electronic.de/> (2005).
- [PIENING, 2004] mündliche Mitteilung Piening, H.: Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, (2004)
- [POLGE 1984] Polge, H.: An attempt to characterize the green streak in cherry [*Prunus avium*] wood. *Annales des Sciences Forestieres* (1984) 41, pp. 1, 45-57, 10 ref.
- [REVEL 2004] Revel, G. M., Marchetti, B., Munaretto, R., Tomasini E. Primo: Non-contact ultrasonic sensor for density measurement and defect detection on wood. In: *Proceedings of the 16th World Conference of Nondestructive Testing*, 30. August – 3. September 2004, Montreal, Canada
- [RIGGER, 2003] Rigger T, Höfflin L, Dill-Langer G., Aicher, S.: Messungen zur akustischen anisotropie von Nadel- und Laubholz; Effekte auf die Quellenortung Querzugbeanspruchung. *Otto Graf Journal* (2003).
- [RINN, 2004] Internetpräsenz RINNTECH Ingenieurbüro und Vertrieb, D-69126 Heidelberg <http://www.rinntech.com/de/> .
- [ROEMPP, 2004] Internetpräsenz RÖMPP Online, Kapitel Holz <http://www.roempp.com/>, Georg Thieme Verlag (2004).
- [RÖLLIG, 2004] mündlich Mitteilung Dipl.-Ing. Röllig, BAM Berlin 2004.
- [ROSNER, 2005] Dr. Sabine Rosner: Mündliche Mitteilung Instituts für Holzforschung und Botanik in Wien (2005).
- [ROSS 1995] Ross, R. J., Fuller, J.J. and J. R. Dramm: Nondestructive evaluation of green defect-prone red oak lumber: a pilot study. *Forest Products Journal* (1995) 45, pp. 11-12, 51-52
- [RUG, 1989] Rug, W. und A. Seemann: *Festigkeit von Altholz*. Bauen mit Holz (1989) 10, S. 696-699.
- [RUSKE, 1989] Ruske, W.: *Sanieren und Modernisieren mit Holz*. Kissing: WEKA Fachverlag GmbH (1989) S. 51-53.

- [RUST, 2000] Rust, S.: A New Tomographic Device for the Nondestructive Testing of Trees. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, Session II.: Strength and MOE, No. 26 (2000); NDT.net - March 2001, Vol. 6 No. 03.
- [SANDOZ 1996] Sandoz, J. L.: Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. In: Proceedings of NDT 1996, 10th Int. Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Aug 26-28, 1996, Lausanne, CH (1996) pp. 147-153
- [SANDOZ 2000] Sandoz, J. L., Benoit, Y. and L. Demay: Wood testing using acousto-ultrasonic. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood University of Western Hungary, 13-15 September 2000, Sopron (2000) pp. 97-104 (2000)
- [SASAKI 1995] Sasaki, Y., Iwata, T., Kuraya, K. and K. Ando: Acoustoelastic effect of wood. Mokuzaï-Gakkaishi, Journal of the Japan Wood Research Society (1995) 41, pp. 12
- [SASAKI, 2000] Sasaki, Y. and M. Hasegawa: Ultrasonic Measurement of Applied Stresses in Wood by Acoustoelastic Birefringent Method. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, Session I.: Sound- and Ultrasound, No. 7 (2000); NDT.net - March 2001, Vol. 6 No. 03.
- [SAUERWEIN, 2002] Sauerwein Christoph, Simon M., Pfeiffer- Schäller I., Tomaschko S., Klein F.: Anwendung der 3D-Computertomographie in Entwicklung und Forschung. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, DGZfP- Jahrestagung in Weimar, Berichtsband auf CD: Vortag 37, Berlin (2002)
- [SCHÄFFLER, 1996] Schäffler, H., Bruy, E. und G. Schelling: Baustoffkunde. Würzburg: Vogel Verlag (1996) 7. Auflage.
- [SCHEER, 1980] Scheer, C. und C. Wagner: Röntgenuntersuchungen an Nägeln, Klammern und Stabdübeln in Holz und Holzwerkstoffen. Bautechnik, 57 (1980) 3, Berlin: Verlag Ernst und Sohn, S. 88-93.
- [SCHICKERT, 1999] Schickert M., Ein empirisches Modell der Dispersion von Ultraschall in Beton Berichtsband DGZfP- Jahrestagung Celle, Mai 10-12, (1999).
- [SCHINDEL 1995] Schindel, D. W. and D. A. Hutchins: Through-thickness characterization of solids by wideband air-coupled ultrasound. Ultrasonics 33 (1995) 1, pp.11-17
- [SCHMOLDT 1994] Schmoldt, D. L., Morrone, M. and J. C. Duke, jr.: Ultrasonic inspection of wooden pallet parts for grading and sorting. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. In: Proceedings of the 13th Symposium, Brunswick, USA, 1.8.-6.8.1993, No. 13B (1994) New York: Plenum Press, pp. 2161-2166
- [SCHMOLDT 1997] Schmoldt, D. L., Nelson, R. M., Ross, R. J. and K. A. McDonald: Ultrasonic inspection of wooden pallet parts using time of flight. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. In: Proceedings of the Twenty-Third Symposium, Brunswick, USA, 28.07.-02.08.1996, Vol. 16B (1997) pp. 1791-1798
- [SCHOLZ, 1999] Scholz, W.: Baustoffkenntnisse. Düsseldorf: Werner Verlag (1999).

- [SCHÖNE 1993] Schöne, W.: Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Brettschichtholz. Bautechnik 70 (1993) 4, S. 192-200
- [SCHUBERT, 2005 (1)] Schubert S., Gsell D., Dual J., Motavalli M., Miemz P.: Resonant ultrasound spectroscopy applied to wood: Comparison of the shear Modulus G_{RT} of wood before and after exposure to fungal pathogens. In: Proceedings of 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 02.-04.05.05, Hannover.
- [SCHUBERT, 2005 (2)] Schubert S. mündliche Mitteilung während des 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hannover (2005)
- [SCHULZE_DEWITZ, 1985] Schulze-Dewitz, G.: Bauzeitung Nr.12/ 1985
- [SCHWAB, 1982] Schwab, A., Waschau, A. und H. Willeiter: Bohrkerne zur Beurteilung der Festigkeit hölzerner Ramppfähle. Bauen mit Holz (1982) 9, S. 566-570.
- [SCHWARZE, 1994] Schwarze, F. und S. Fink: Die Ermittlung der Holzersetzungsmuster am lebenden Baum. Neue Landschaft (1994) S. 182-193.
- [SCHWARZE, 2004] Schwarze, F., Rabe, C., Ferner, D. und S. Fink: Schalltomographische Untersuchung an pilzinfizierten Bäumen. Der Wald. Hannover: Deutscher Landwirtschaftsverlag (2004) S. 2-7.
- [SEELING, 2002] Seeling, U., Ballarin, A.W. and F. C. Beal: Process and Analysis of signals Through Dimension Wood Using Acousto-Ultrasonics. In: Proceedings of 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000.
- [SIAU, 1984] Siau, J. F.: Transportprocess in wood. Berlin: Springer (1984).
- [SOCCO 2002] Socco, V., Sambuelli, L., Martinis, R., Nicolotti, G. and E. Comino: Feasibility of ultrasonic tomography for NDT of decay on living trees. Res. Nondestructive Eval. At press
- [SOMA 2000] Soma Tomoaki, Shida Satoshi, Arima Takanori: Application of ultrasonic scanning in the wood products industry, In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, No. 52 (2000); pp. 87-96.
- [SPECKHARDT, 2002] Speckhardt, M.: Ultraschall zum Lokalisieren innerer Schäden. Restaura 7 (2002).
- [STÖSSEL, 2004] Stößel, R.: Air-Coupled Ultrasound Inspection as a New Nondestructive Testing Tool for Quality Assurance, Dissertation, Stuttgart (2004).
- [SUTTNER, 2002] Suttner, H.-P.: Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen. Bern: Haupt Verlag (2002) 164 Seiten, 4. Auflage.
- [TANAKA, 2000] Tanaka, T. und F. Divos: Thermography Inspection of Wood. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 13-15 September 2000, Session VII.: Thermography, No. 52 (2000); NDT.net - March 2001, Vol. 6 No. 03.
- [THÜMLER, 1991] Thümmeler, U.: Holzuntersuchung mit der Bohrwiderstandsmethode. Bauen mit Holz 12 (1991) S. 942-945.

- [TICHELMANN 1993] Tichelmann, K. und U. Grimminger: Zerstörungsfreie Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Konstruktionsholz durch Ultraschall-Laufzeitmessung. Bautechnik 70 (1993) 4, S. 218-224
- [TIITTA 2002] Tiitta Markku: Measurement of pulpwood freshness using electrical impedance spectroscopy. Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 19. - 21. August 2002, University of California, Berkeley Campus, California, USA, pp 27-32.
- [TRENDELENBURG, 1955] Trendelenburg, R. und H. Mayer-Wegelin: Das Holz als Rohstoff. München: Carl Hauser Verlag (1955).
- [TUCKER, 2002] Tucker, B., Bender, D., Pollock, D. and M. Wolcott: In: Ultrasonic Plate Wave Evaluation of Natural Fiber Composite Panels. Beall, F. C. (ed.); Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 19. - 21. August 2002, University of California, Berkeley Campus, California, USA, pp. 221.
- [VERES, 2004] Veres, I. and M. Sayir: Wave propagation in a wooden bar. Ultrasonics 42 (2004) pp. 495-499.
- [VOGEL, 1995] Vogel, H.: Gerthsen Physik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag (1995), 18. Auflage.
- [VUN 2004] Vun, R. Y. and M. C. Bhardwaj: Non-contact ultrasonic characterization of in-plan density variation in oriented strandboards. In: Proceedings of the 16th World Conference of Nondestructive Testing, 30. August – 3. September 2004, Montreal, Canada
- [WALTHELM 1988] Walthelm, U.: Experimentelle ermittelte Festigkeits- und Brucheigenschaften von Holz in alten Bauwerken. Bauingenieur 63 (1988) S. 273-275
- [WALTHELM, 1988] Walthelm, U.: Experimentelle ermittelte Festigkeits- und Brucheigenschaften von Holz in alten Bauwerken. Bauingenieur 63 (1988) S. 273-275.
- [WANG, 1990] Wang, P. C., Chang, S. J. and J. R. Olson: Scanning logs with an NMR scanner. In: Proceedings of the 7th Nondestructive Testing of Wood Symposium, September 27-29, 1989, Madison, WI, Washington State University (1990) pp. 209-219.
- [WEISE, 2004] Weise, F., Patitz, G., Redmer, B. und M. Hübner: Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Strukturaufklärung beim Markttor von Milet. In: Tagungsband zur Tagung Natursteinsanierung, Stuttgart, 19. März 2004, München: Siegelverlag (2004).
- [WENK 1997] Wenk Carola: Algorithmen für das Crossdating in der Dendrochronologie, Diplomarbeit an der Freien Universität Berlin, Fachbereich Mathematik und Informatik, Institut für Informatik, Berlin (1997).
- [WENZEL, 1999] Wenzel, F. und J. Kleinmanns: Sonderforschungsbereich 315, Historische Holztragwerke, Untersuchungen, Berechnungen und Instandsetzen. Universität Karlsruhe (1999).
- [WILSCH, 2004] Wilsch, G. und F. Weritz: Anwendung der Laser-Induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) im Bauwesen. In: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender

2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 3 Materialeigenschaften, Absch. 3.2, S. 386-392.

[WU, 1996] Wu, D. and G. Busse: Remote inspection of wood with lock-in thermography. TAPPI JOURNAL, Vol. 79 (1996) No. 8, pp. 119-123.

[WYCKHUYSE, 2002] Wyckhuysen, A. and X. Maldague: Wood inspection by infra-red thermography. In: Maldague, X. (ed.); Proceedings of IVth IWASPNDE, TONES (ASNT pub.), 6 (2002) pp. 201-206.

Verwendete Normen

[DIN,1974] Deutsches Institut für Normung: DIN 68800-1 Holzschutz im Hochbau – Allgemeines, Ausgabe 1974-05., Berlin: Beuth Verlag (1974).

[DIN,1996] Deutsches Institut für Normung: DIN 68800-2 Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, Ausgabe 1996-05, Berlin: Beuth Verlag (1996).

[DIN,1990] Deutsches Institut für Normung: DIN 68800-3 Holzschutz; Vorbeugender chemischer Holzschutz, Ausgabe 1990-04, Berlin: Beuth Verlag (1990).

[DIN,1992] Deutsches Institut für Normung: DIN 68800-4 Holzschutz; Bekämpfungsmaßnahmen gegen holzerstörende Pilze und Insekten, Ausgabe 1992-11, Berlin: Beuth Verlag (1992).

12 Veröffentlichungen

- [HASENSTAB 2006] Hasenstab, A., Krause, M.: Ultraschall-Echotechnik zur Ortung von Minderdicken und Schäden in Holzbauteilen (Bauwerksdiagnose 2006, Berlin)
- [HASENSTAB 2006 (1)] Hasenstab, A., Krause, M., Scheer C.: Zerstörungsfreie Integritätsprüfung von Holz mit dem Ultraschallecho-Verfahren, Tagungsband Forschungskolloquium Holzbau Forschung und Praxis 23.-24.2.2006 in Stuttgart (2006)
- [HASENSTAB 2005] Hasenstab, A.: Zerstörungsfreie Prüfung von Holzbauteilen mit der Ultraschall-Echo-Technik; Mikado 11/05, WEKA Media, Deutschland (2005)
- [HASENSTAB, 2005 (1)] Hasenstab, A., Osterloh, K., Robbel, J., Krause, M., Ewert, U. und B. Hillemeier: Mobile X-Ray Inspection for Detection Wood Damages. In: Proceedings of 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 02.-04.05.05, Hannover.
- [HASENSTAB, 2005 (2)] Hasenstab, A., Krause, M., Bühling, L., Hilger, W., Ilse, D., Hillemeier, B. und C. Rieck: Air coupled Ultrasound and Ultrasound Echo Technique at wood. In: Proceedings of 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 02.-04.05.05, Hannover.
- [HASENSTAB, 2005 (3)] Hasenstab, A., Hillemeier, B. und M. Krause: Defect Localisation in Wood with Low Frequency Ultrasonic Echo Technique. In: Proceedings of 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 02.-04.05.05, Hannover.
- [HASENSTAB, 2005 (4)] Hasenstab, A., Krause, M., Hillemeier, B. und C. Rieck: Luftultraschall und Ultraschall-Echo an Holz. Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2005, 02.-04.05.05, Rostock.
- [HASENSTAB, 2005 (5)] Hasenstab, A., Krause, M., Hillemeier, B. und C. Rieck: Niederfrequente Ultraschall-Echo-Verfahren und Bohrwiderstandsmessung zur Bauteiluntersuchung. Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2005, 02.-04.05.05, Rostock.
- [OSTERLOH, 2005] Osterloh, K, Hasenstab A., Ewert, U., Krause M., Goebbels J.: Mobile radiographische Untersuchung von Holz und Bäumen. Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2005, 02.-04.05.05, Rostock.
- [OSTERLOH, 2005 (1)] Osterloh, K, Hasenstab, A., Zscherpel U., Goebbels J., Ewert, U.: Non-Destructive Testing of Wood by Radiography, MATEST 2005, October 6-8, 2005, Opatija, Croatia (p. 108-119).
- [HASENSTAB, 2004 (1)] Hasenstab, A. und M. Krause: Ultraschallechoverfahren an Holz. In: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.5, S. 352-358.
- [HASENSTAB, 2004 (2)] Hasenstab, A., Krause, M., Rieck, C. und B. Hillemeier: Materialuntersuchung an Holz mit niederfrequenter Ultraschall-Echotechnik. In Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 17.-19. Mai 2004 in Salzburg, DGZfP-Berichtsband auf CD, Vortrag 87, Berlin (2004).

- [HASENSTAB, 2004 (3)] Hasenstab, A., Osterloh, K., Robbel, J., Krause, M., Ewert, U. und B. Hillemeier: Mobile Röntgenblitzröhre zum Auffinden von Holzschäden. In Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 17.-19. Mai 2004 in Salzburg, DGZfP-Berichtsband auf CD, Plakat 15, Berlin (2004).
- [HASENSTAB, 2004 (4)] Hasenstab, A., Krause, M., Osterloh, K., Hillemeier B., Rieck C.: Zerstörungsfreie Materialprüfung von Holz mit Ultraschallecho- und mobiler Röntgentechnik; Tagungsband des Holzschutzverbandes Berlin Brandenburg, 04.12.04, TFH-Wedding, Berlin (2004)
- [OSTERLOH 2004] Osterloh K., Zscherpel U., Hasenstab A., Ewert U.: Digital images and visual perception, a key tool in NDT. MATEST 2004 Conference "Competence & Safety", CrSNDT, CD Zagreb, Kroatien (2004)
- [HASENSTAB, 2003] Hasenstab, A., Krause, M., Rieck, C. und B. Hillemeier: Use of low Frequency Ultrasound Echo Technique to Determine Cavities in wooden Construction Composites. In: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, P51, Berlin (2003).
- [HASENSTAB, 2002 (1)] Hasenstab, A., Rieck, C., Hillemeier, B. und M. Krause: Hohlstellenortung in Holzbalken mit dem Ultraschallverfahren. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung. In: Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung in Weimar, Berichtsband auf CD, Plakat 32, Berlin (2002).
- [HASENSTAB, 2002 (2)] Hasenstab, A.: Die Hohlstellenortung bei Holzbauteilen mit dem Ultraschallverfahren, Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin, unveröffentlicht (2002).

Begutachteter und angenommener Text:

- [HASENSTAB 2005] Hasenstab, A., Krause, M., Rieck, C., Hillemeier, B.: Ultraschall-Echo-Messungen an Holz; Holz als Roh- und Werkstoff, Springer-Verlag, Deutschland (2005)

Im Druck:

- [HASENSTAB 2006] Hasenstab, A., Taffe, A., Arndt, R.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren und deren Anwendung an Beton, in: 2.Tragwerksplanung im Bestand, Fraunhofer-Verlag (2005)
- [HASENSTAB 2006] Hasenstab, A., Krause, M.: Niederfrequente Ultraschall-Echo-Verfahren und Bohrwiderstandsmessung zur Untersuchung von Holzbauteilen, in: 2.Tragwerksplanung im Bestand, Fraunhofer-Verlag (2005)

13 Danksagung

Persönlich danke ich Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier und Prof. Dipl.-Ing. Claus Scheer für die Möglichkeit zur Promotion mit dieser Aufgabenstellung sowie für die stete Hilfe bei der Konkretisierung. Dr. Martin Krause danke ich für die intensive Betreuung bei der Ultraschallfragestellung sowie Dr. Kurth Osterloh für die Betreuung der Röntgenuntersuchungen. Der Fachgruppe IV.4 der BAM unter der Leitung von Dr. Herbert Wiggenhauser und der gesamten Fachgruppe danke ich für die vielen Anregungen und Unterstützung meiner Arbeit. Besonders hilfreich waren Boris Mielmann und Frank Mielentz für die Hilfe bei der Messtechnik, Dr. Friederike Weritz und Gerd Wilsch bei den LIBS-Messungen, und für die tatkräftige Unterstützung danke ich Kerstin Borchert, Dieter Schaurich, Ingo Krause, Marco Lange, Sean Smith, Thomas Kind, Ernst Niederleiting, Dr. Christiane Maierhofer und Ralf Arndt. Für die gemeinsamen Messungen und Gespräche danke ich Tina Martin, Manfred Grinda, Dr. Uwe Ewert, Dr. Jürgen Göbbels und Jochen Robbel.

Weiter danke ich Dr. Otto Kroggel und Jan Lutz von der TU Darmstadt für ihren Einsatz bei den Messungen in Thierhaupten und sonst für den fruchtbaren Ergebnisaustausch. Herrn Martim Saar vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege danke ich für die gute Erläuterung der Denkmalpflege und die Bereitstellung der Versuchsobjekte im Kloster Thierhaupten.

Für die gute Zusammenarbeit bei gemeinsamen Messungen mit Luftultraschall danke ich Dr. Lutz Bühling und Dr. W. Hillger vom Ingenieurbüro Hillger, bei den Messungen mit dem Schalltomographen PICUS Lothar Göcke vom Ingenieurbüro Argus Elektronik und Carsten Rieck der Materialprüfanstalt Berlin Brandenburg und H. Erdmann der Materialprüfanstalt Eberswalde. Für die gute Diskussion und die Unterstützung meiner Messungen durch eine Leihgabe eines Probekörpers der MPA Stuttgart danke ich Dr. Simon Aicher und Dr. Gerhard Dill-Langer. Für die Unterstützung zu Fragen in der Theorie danke ich Dr. Frank Schubert des IZFP Dresden, Sandy Schubert der ETH Zürich und Dr. Dietger Grosser des Holzforschungszentrums München und Dr. Sabine Rosner des Instituts für Holzforschung und Botanik in Wien. Für die kritische Diskussion danke ich Prof. Dr. Glos und Herrn Gaede des Holzforschungsinstitutes München sowie Mathias Krolak des Informationsdienstes Holz und H. Piening von der Bayerischen Schlösser und Seenverwaltung.

Dafür, dass sie mir mein Studium und die Promotion ermöglicht haben, danke ich meinen Eltern Ingrid und Hans-Georg Hasenstab. Für die angenehme Ablenkung und den geistigen Ausgleich danke ich meinem Bruder Sebastian und meinen Freundinnen und Freunden. Weiter danke ich für die vielen Anregungen Prof. Dr.-Ing. Klaus Ehrlenspiel.

Und für die anregenden Diskussionen über die Anwendung der Ultraschall- und Röntgentechnik in der Medizin und an Holz und immerwährende Unterstützung und Aufmunterung danke ich meiner Gattin Ulrike Duckstein.

14 Anhang

A.1 Kontakte

A.1.1 Mitteilungen

Zum Thema Ultraschall an Holz

- Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI Braunschweig (Herr Dr. Plinke: Ultraschall Transmission, ZfP)
- Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren EADQ Dresden (Herr Dr. Schubert: Modellierung, Ultraschall allgemein)
- Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes (Herr Dr. Schwab: Literatur, Holzdaten)
- Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, (Herr Görlacher: kein Ultraschall, zerstörungsarme Verfahren)
- Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Eberswalde, Institut für Forstökologie und Walderfassung, (Herr Prof. Bröker, Herr Prof. Drainer: früher Ultraschall, derzeit keine Forschung mit Ultraschall an Holz in Deutschland bekannt)
- Institut für Holz Technologie Dresden (ihd) GmbH (Herr Hobohm: früher Ultraschall an Holz, Literatur. Herr Weiß)
- Krautkrämer/ Agfa NDT GmbH Entwicklungsabteilung (Herr Habenstein: Prüfköpfe und Ankopplung)
- ETH-Zürich: Prof. Niemz: Simulation und Ultraschall Transmission, kein Echo möglich (stand: Mai2005)
- EMPA Zürich: Frau Schubert: Simulation von Ausbreitung von Wellen in Stämmen in radialer Richtung

Zum Thema praktische Anwendung zur Ortung von Schäden in Holzbauteilen

- Holzschutzfachverband (Herr Zabel: Praxis: Bohrwiderstandsmessung mit Bohrmaschine, Abbeilen, Stichel)
- Holzschutzfachverband Norddeutschland e.V.
- Holzschuttsachverständiger (Herr Sander: allgemeine Information zur Forschung mit Ultraschall)
- Holzschuttsachverständiger (Herr Bücking: Anfrage wegen Schadensfall)
- Holzschuttsachverständiger (Herr Petzold: praktische Anwendung, Probekörper von Marienkirche in Wittemberg)

- Holzschutzsachverständiger (Herr Reuss: früher IHD praktische Anwendung, Holzspielplatzgeräte)

A.1.2 Persönliche Besuche

- Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGFH) Herr M. Krolak: aktuelle Forschung der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung
- Institut für Holzforschung München HFM (Herr Gaede: Ultraschall-Transmission mit Pundit; Professor Glos: Zeitschrift: Holz als Roh- und Werkstoff)
Dr Grasser: Holzschadensspezialist
- TU Cottbus: Prof. Kothe (verstorben) Ultraschallversuche in Transmission
- Fachverband des Holz- und Bautenschutzes (Herr Flohr: Bohrwiderstand, Gemeinsamer Besuch von Schadensfall zur Probekörperbeschaffung in Schloß Reinharz)
- Schlösser und Seenverwaltung München, Herr Piening
- Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Herr Saar: reale Probleme)
- MPA Stuttgart: Dr. Aicher, Dr. Dill-Langer: Transmission, Rissortung bei BSH, Fehlverklebungen

A.2 Ultraschall

A.2.1 Schalldruck und Schallfeld von Ultraschall

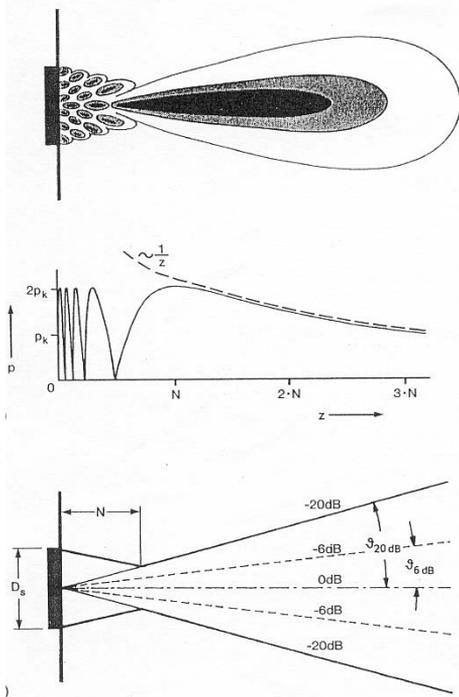


Abbildung 117: Schallfeld eines kreisförmigen Kolbenschwingers, oben schematische Darstellung, dunkle: Zonen höheren Schalldrucks, hell: Zonen geringeren Schalldrucks; unten: Schalldruck auf der Mittelachse (Absolutbetrag) [DEUTSCH, 1997]

Nahfeld $z < N$

Fernfeld $z > N$

Der **Schalldruck** p hängt direkt mit der Teilchenauslenkung ξ zusammen, was bedeutet, dass eine Zunahme der Teilchenauslenkung (Amplitude) zu einer Zunahme des Schalldrucks (genauer: Schallwechseldrucks) führt. Dieser, von einem Empfänger aufgenommene, Schalldruck ist direkt proportional zur Höhe der Amplitude z. B. am Oszilloskope und wird in mV gemessen. Dieser Schall(wechsel)druck setzt sich aus zeitlichen und örtlichen Druckmaxima und –minima zusammen (Abbildung 117) und bildet ein **Schallfeld**.

Die Form des Schallfeldes ist von der Schallfrequenz und der Größe der Schallquelle abhängig, die Größe des Schallfeldes im Raum von der abgestrahlten Schallenergie.

Das Schallfeld kann in einen Bereich der starken Schwankungen des Schalldrucks in der unmittelbaren Zone des Schwingers, dem **Nahfeld** und einen Bereich mit einer einheitlichen Wellenfront, dem **Fernfeld**, unterschieden werden.

Für einen kreisrunden Schwinger wird in erster Näherung ein Raum ausgefüllt, der von den Schwingerabmessungen und der Frequenz des Schwingers abhängig ist.

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4c} \quad (\text{bei } D/\lambda \gg 1)$$

Gleichung 10: erste Näherung für die Nahfeldlänge von kreisrunden Schwingern [KRAUTKRÄMER, 1986]

N Nahfeld

D Schwingerdurchmesser

Dies bedeutet, dass das Nahfeld mit Zunahme des Schwingerdurchmessers und Zunahme der Frequenz größer wird. Diese Annahmen setzen voraus, dass der Durchmesser der Schallquelle sehr groß im Verhältnis zur Wellenlänge λ ist, was bei Stahl mit hohen Prüffrequenzen der Fall ist.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{5,92 \text{ km/s}}{4 \text{ MHz}} = 1,5 \text{ mm} \quad \text{und} \quad \frac{D}{\lambda} = \frac{10 \text{ mm}}{1,5 \text{ mm}} = 7 \quad \text{mit dem Nahfeld} \quad N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{10^2 \text{ mm}^2}{4 \cdot 1,5 \text{ mm}} = 17 \text{ mm}$$

Im niederfrequenten Ultraschall können diese Näherungsformeln nur zur groben Abschätzung des Nahfeldes angewandt werden. Bei Ultraschalluntersuchungen an Beton und Holz mit

$$c_{\text{LongBeton}} = 4,0 \text{ km/s}$$

$$c_{\text{LongHolz/axial}} = 3,6 \text{ km/s}$$

$$c_{\text{LongHolz/radial}} = 1,8 \text{ km/s}$$

$$c_{\text{LongHolz/tangential}} = 1,2 \text{ km/s,}$$

einer Messfrequenz von 100 kHz und einem Wandlerdurchmesser von $D = 39 \text{ mm}$ ergibt sich:

$$\frac{D}{\lambda_{\text{Beton}}} \approx \frac{D}{\lambda_{\text{Holz/axial}}} = 1 \quad (\text{Kugelwelle}) \quad \text{und} \quad N = \frac{D^2}{4\lambda} = 1 \text{ cm}$$

$$\frac{D}{\lambda_{\text{Holz/radial}}} = 2,2 \quad \text{und} \quad N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{39^2 \text{ mm}^2}{4 \cdot 18 \text{ mm}} = 2 \text{ cm}$$

$$\frac{D}{\lambda_{\text{Holz/tangential}}} = 3,3 \quad \text{und} \quad N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{39^2 \text{ mm}^2}{4 \cdot 12 \text{ mm}} = 3 \text{ cm}$$

Bei den Untersuchungen im Echobetrieb treffen die Longitudinalwellen radial und tangential auf die Faser und hier muss das Nahfeld N berücksichtigt werden, was bedeutet, dass in tangentialer Richtung Defekte bis zu einer Tiefe von etwa 3 cm nicht erkannt werden können.

Für die Messungen ist auch der Schallausbreitungswinkel wichtig, mit Gleichung 11 wird der Bereich gekennzeichnet, in dem die Schallenergie um die Hälfte abfällt.

$$\sin \vartheta = 0,7 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Gleichung 11: erste Näherung für den Schallausbreitungswinkel bei 6 dB

Für die Longitudinalwellenprüfköpfe ergibt sich hierbei $\vartheta_{\text{Holz/radial}} = 19^\circ$ und $\vartheta_{\text{Holz/tangential}} = 12^\circ$.

A.2.2 Versuchskörper

Aus der großen Anzahl der Messungen an verschiedenen Versuchskörpern werden folgend nur diejenigen Aufgeführt, an denen besonders wichtige Messungen durchgeführt wurden.

Probekörper

Name	Holzart	Abmessungen L x B x H (in cm)	Besonderheiten	woher
Referenzkörper R	Kiefer	60 x 20 x 10	Kernholz	BAM
P0 Probekörper0	Kiefer	109 x 20 cm x 9,5	sehr hoher tangentialer, rissfreier Kernholzanteil	BAM
P1 Probekörper1	Kiefer	36 x 20 x 9,5	Wie P0	BAM
P2 Probekörper2	Kiefer	35 x 20 x 9,5	Wie P0	BAM
P3 Probekörper3	Kiefer	37 x 20 x 9,5	Wie P0	BAM
P2n Probekörper2n	Kiefer	36 x 20 x 9,5	Wie P0	BAM
P6	Fichte	115 x 12 x 6	Schlank, mit Ästen	BAM

Ausgebaute Bauteile

REI01, REI02, REI03, REI04	Nadelholz	(Kapitel A.5.1)	Innenfäule	Barockes Wasserschloss Reinharz
SCH5	Fichtenbalken		mit Fäule	Gartenamt Spandau
BER1	Kiefer	(Kapitel A.5.1)	Fäulnis	Berlin Mitte: Altbausanierung
SCH1	Fichte		Fäulnis	Berlin Friedrichshain: Altbausanierung
WIT0, WIT1, WIT2, WIT3	Eiche	26,6 x 20		Marienkirche Wittenberg
INS1	Fichte	16 x 15	Insektenbefall	Mönchsheim b. Berlin

Bauteile (noch eingebaut)

Sparren	Fichte	Ca. 11 x 17	Risse, Äste	Murnau
Stütze 1, 2, 3	Fichte		Aussparungen	Thierhaupten
Deckenbalken	Fichte	22,5 x 37	Fäulnis	Thierhaupten
Dachwerk	Fichte		Verblattung	Thierhaupten

A.2.3 A-Bilder unterschiedlicher Frequenzen von Longitudinalwellen

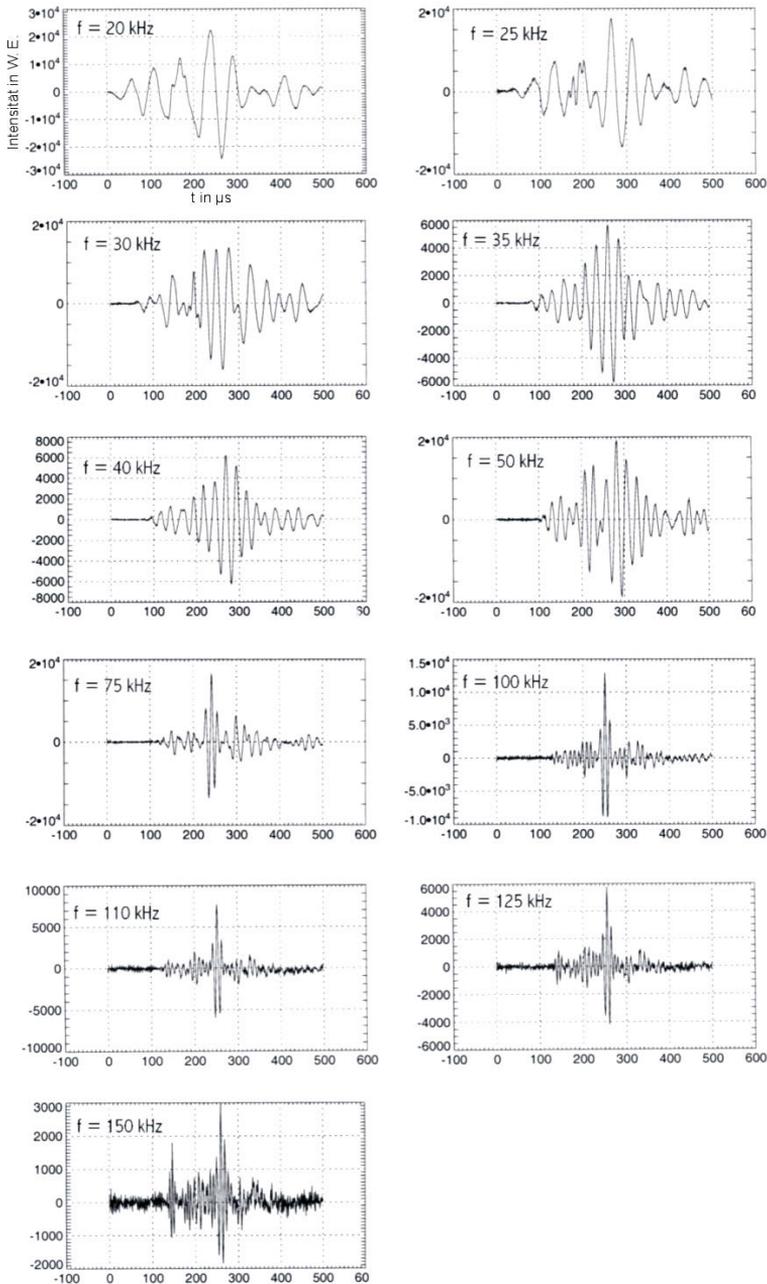


Abbildung 118: Ultraschall-Echo A-Bilder bei unterschiedlichen Frequenzen an Kiefernholz (Beschriftung links oben) mit Prüfkopf G 0,2 GC (Ankopplung nach Abbildung 61 links); klares Echo bei 100 kHz wird künftige Impulsfrequenz

A.2.4 Ergebnisse am Probekörper P1 mit der Longitudinal- und Transversalwellen

Der Probekörper P1 (Abbildung 85) ist 9,5 cm dick und 20 cm breit. Schäden senkrecht zur Faser wurden durch Bohrungen senkrecht zur Faser simuliert. Einen Vergleich der beiden Wellenarten am Probekörper P1 entlang Messlinie 1 (Abbildung 86) zeigen Abbildung 119 und Abbildung 120. Mit Longitudinalwellen ist deutlich das Echo an der Minderdicke (links) an der Bauteilrückwand und an der Bohrung mit einem Durchmesser von 3,0 cm zu sehen.

Das B- Bild in Abbildung 120 zeigt die gleiche Messung mit Transversalwellen (55 kHz). Hier ist neben den Oberflächenwellen das Rückwandecho im rechten Bereich zu erkennen. Das teilweise sogar Vielfachechos aufweist.

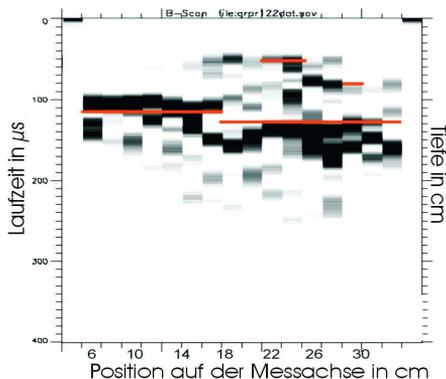


Abbildung 119: B-Bild einer Messung mit Longitudinalwellen (100 kHz) entlang Probekörper Messlinie 1 (Abbildung 86) des Probekörpers P1 (Abbildung 85) mit Echo an Minderdicke, Rückwand und Bohrung senkrecht zur Faser. Zum besseren Vergleich sind die realen Bauteilabmessungen als rote Linie eingezeichnet.

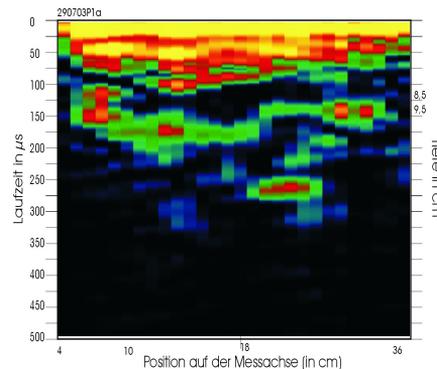


Abbildung 120: B-Bild einer Messung mit Transversalwellen (55 kHz) entlang Probekörper Messlinie 1 (Abbildung 86) des Probekörpers P1 (Abbildung 85) mit Echo an Rückwand und Bohrung

A.2.5 Laufzeitkorrigierte Überlagerung und SAFT

Mit dem Array aus zehn Prüfköpfen G 0,2 GC (100 kHz) in der Schablone E, ergeben sich bei der Messung 90 Messkurven. Das Ergebnis der Messung am Probekörper R ist in Abbildung 121 dargestellt.

Die Anisotropie des Holzes wurde bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt, da sie äußerst kompliziert herausgerechnet werden müsste. Doch ohne diese Veränderung ist dieses Verfahren an dem anisotropen Werkstoff Holz nicht geeignet. Bei S/E-Betrieb mit nur zwei Prüfköpfen wurden jedoch vergleichbar gute Ergebnisse erzielt und so wird im Rahmen der Arbeit der Platz sparende Zweikopfbetrieb dem Zehnkopfbetrieb vorgezogen.

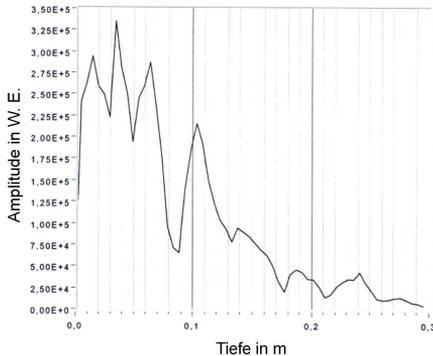


Abbildung 121: Auswertung der Arraymessung mit zehn Prüfköpfen G 0,2 GC, mit 100 kHz in Schablone E angeordnet

Durch die schon oft erwähnte Anisotropie, d. h. die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten in den verschiedenen anatomischen Richtungen von Holz kommt es hier zu einer Ungenauigkeit.

SAFT

In Abbildung 122 ist ein Bildschirmausdruck einer Messung am Probekörper R zu sehen, wobei ein intensives Rückwandecho des Körpers bei 20 cm und zwei Vielfachechos zu sehen sind. Dies zeigt, dass mit dem Array an Bauteilen großer Abmessungen Messungen durchgeführt werden können.

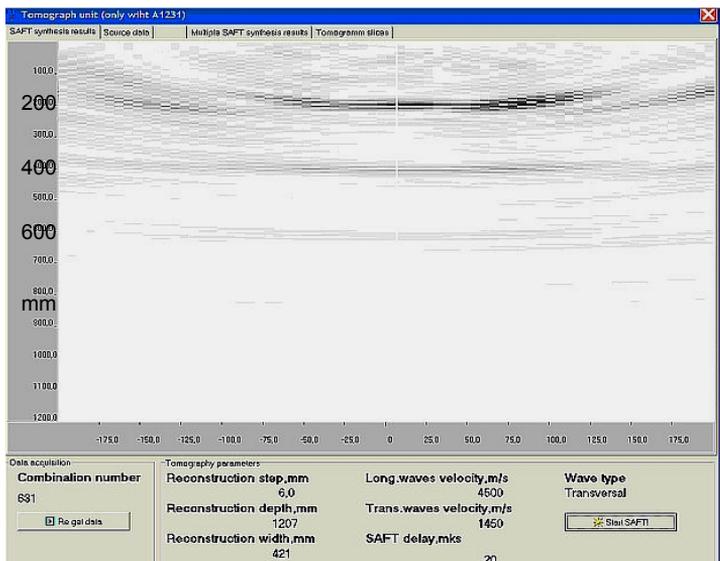


Abbildung 122: Ergebnis einer SAFT-Messung Am Probekörper R (hochkant h = 20 cm) mit Echos der Rückwand bei 20 cm und zwei Vielfachechos

A.3 Röntgenexperimente an Holz

Die Ultraschallechomethode bietet den großen Vorteil, schnell und problemlos große Areale zu untersuchen. In bestimmten Fallkonstellationen wie z. B. bei einem fehlenden Rückwandecho war damit jedoch keine Interpretation möglich.

Um die Grenzen des Verfahrens aufzuweiten wurden deswegen in Zusammenarbeit mit der Abteilung VIII.3 der BAM, Röntgenverfahren eingesetzt.

Der Nachteil herkömmlicher Röntgenuntersuchungen (Kapitel 4.2.5) war die Unbeweglichkeit und hohe Strahlenbelastung der Umwelt.

Die Intention der vorliegenden Arbeit war aber die Entwicklung eines leicht handhabbaren Prüfverfahrens. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit mobile Röntgenröhren in Kombination mit digitaler Radiografie eingesetzt. In der Literatur wurden diesbezüglich keine Forschungsergebnisse zur Anwendung an Holz gefunden.

In diesem Kapitel wird nach knapper Darstellung der Grundlagen der Röntgentechnik und des Versuchsaufbaus eine Darstellung der Ergebnisse zu verschiedenen Schadensmodellen gezeigt, die teilweise durch CT-Aufnahmen verifiziert wurden.

A.3.1 Allgemeine Grundlagen zur Röntgentechnik

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Strahlen jenseits des UV-Spektrums mit einer Wellenlänge λ von ca. 10^{-2} – 10 nm und können lichtundurchlässige Materialien durchdringen. Detaillierte Angaben zur Entstehung der Röntgenstrahlung kann [HAKEN, 1990, KUCHLING, 1996, OTTER, 1998, VOGEL, 1995] entnommen werden.

Zur Materialprüfung wird die Röntgentechnik sowohl stationär im Labor als auch mobil außerhalb eingesetzt. Für den Einsatz der Röntgentechnik außerhalb des Labors wie z. B. zur Untersuchung von Schweißnähten, Bauteilen, Fundmunition, im Sicherheitsbereich und in der Veterinärmedizin stehen mobile Röntgenröhren zur Verfügung.

Besonders im Sicherheitsbereich werden Blitzröhren verwendet, die anstatt einer kontinuierlichen Strahlung Röntgenblitze aussenden und batteriebetrieben sind. Mit einem hochtransformierten Entladungsimpuls, der über einen Ladekondensator erzeugt wird, (Abbildung 123) werden Röntgenblitze mit einer vorgegebenen Anodenspannung generiert.

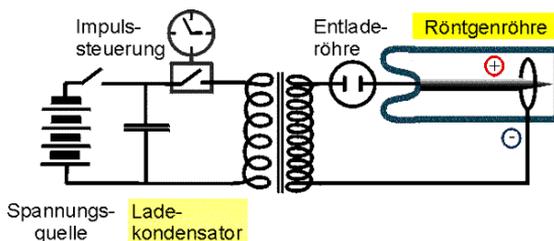


Abbildung 123: Funktionsprinzip der Röntgenblitzröhre [OSTERLOH, 2003]

Die Intensität der Strahlung kann über Filmschwärzung, Aufleuchten von Fluoreszenzfolien oder mittels Flachdetektoren auf Halbleiterbasis gemessen werden. Die wichtigsten Schwächungsmechanismen der Intensität sind der Photoeffekt und der Comptoneffekt

[VOGEL, 1995]. Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Schwächung der Röntgenstrahlung umso größer ist, je höher die Elektronendichte, d. h. die Ordnungszahl der chemischen Elemente, die Dichte oder die Dicke des Probekörpers ist.

In der konventionellen **Radiologie** wird auf dem Empfänger (z. B. Film, Speicherfolie oder Detektor) ein Bild der Intensitätsverteilung erzeugt, welches durch eine anschließende Entwicklung sichtbar ist. Dabei entsprechen die dunklen, d. h. die stärker geschwärzten Areale, Bereichen hoher empfangener Intensität. Dichtere oder dickere Materialien absorbieren mehr Strahlung und so ist die empfangene Intensität geringer, was dann im Bild als heller Bereich zu sehen ist (Negativbild). In der folgenden Arbeit wird die Radiographie angewendet, da damit die Möglichkeit besteht, über eine längere Bestrahlungszeit mit weicher Strahlung geringfügige Dichteunterschiede besser darzustellen.

Dreidimensionale Darstellungen können mit der **Computer-Tomographie** (CT) erzielt werden. Dabei werden Projektionen aus allen Raumrichtungen mittels eines Rechners zu einer Dichtenverteilung im Raum des Probekörpers rekonstruiert.

Die Qualität des Bildes ist von der Ortsauflösung und dem Kontrastvermögen abhängig. Das Spektrum der Strahlung und die Brennfleckgröße wie die Abstände zwischen Fokus-Probekörper, Probekörper-Detektor, sowie die Auflösung des Detektors haben von Seiten der Versuchsanordnung einen Einfluss auf die Bildqualität. Der Probekörper hat auch durch die Geometrie, Dichte und verursachte Streustrahlung einen Einfluss auf das Ergebnis.

A.3.2 Experimenteller Aufbau

A.3.2.1 Stationäre und mobile Röntgenröhren

Stationäre Röntgenröhren

In Abbildung 124 ist die stationäre Röntgenröhre Isovolt 320/13 des Herstellers Seifert dargestellt. Die Röntgenröhre besitzt ein Berylliumfenster und die Beschleunigungsspannung lässt sich auf Werte zwischen 30 kV und 320 kV einstellen. Holz ist ein Material mit geringer Dichte und schwachen Dichteunterschieden. Damit ist niederenergetische Röntgenstrahlung vorteilhaft, d. h. es werden geringe Beschleunigungsspannungen von etwa 60 kV verwendet.



Abbildung 124: links stationäre Röntgenröhre Seifert Isovolt 320/13 mit Probekörper und rechts Agfa Flachdetektor (DirectRay am-Se, DDA digital detection array)

Portable Röntgenröhren

Im Zuge der Entwicklung besonders kleiner, leichter und von einer äußeren Stromquelle unabhängiger Röhren wurden die Blitzröhren entwickelt. In den Versuchen wurde größtenteils die Röntgenblitzröhre GE XRS-3 (Abbildung 125, 300 kV, Anschaffungskosten ca. 8000 €) der Firma Golden Engineering, (Centerville, IN, USA) angewendet.

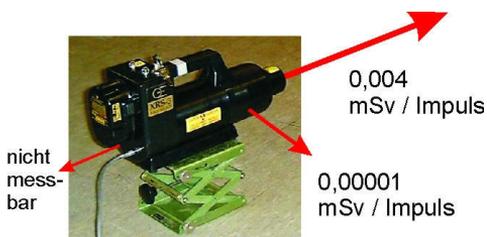


Abbildung 125: Röntgenblitzröhre GE XRS-3 (300 kV) der Firma Golden Engineering mit unterschiedlichen Dosisleistungen [OSTERLOH, 2003]



Abbildung 126: Messaufbau mit Röntgenblitzröhre (rechts), links Agfa Flachdetektor (Typ "DirectRay am-Se") und Baumstamm mit Schadstelle am Astansatz

Weitere Messungen wurden mit der Blitzröhre XR200 (150 kV) durchgeführt, die wahlweise mit einem Berylliumfenster bestückt werden kann.

Blitzröhren sind besonders für mobile Anwendung geeignet, da sie ein geringes Eigengewicht von 5,5 kg (XRS-3) und 5,2 kg (XR200) aufweisen und mittels Akkubetrieb von äußerer Stromversorgung unabhängig sind.

Vergleichsmessungen ergaben, dass die Dosisleistung der Blitzröhre ist im Vergleich zu kontinuierlich strahlenden, stationären Röhren geringer ist [OSTERLOH, 2003]. In Abbildung 125 ist von der Blitzröhre XRS-3 die Dosis pro Impuls in Abstrahlrichtung und zur Seite angegeben. So ergeben sich bei der Blitzröhre viel geringere Strahlenschutzabstände und eine Anwendung vor Ort ist besser möglich. Auf der anderen Seite reicht die Leistung der Blitzröhre zur Belichtung eines herkömmlichen Röntgenfilmes mit Bleifolien in einer vertretbaren Zeit nicht aus, und so werden empfindlichere Detektoren (Speicherfolie, Flachdetektoren auf TFT-Basis) verwendet.

A.3.2.2 Detektoren zur Datenaufnahme

Alle Messungen wurden mit digitaler Radiographie durchgeführt. Dabei wurden keine herkömmlichen Röntgenfilme sondern Flachdetektoren oder Speicherfolien verwendet. Diese haben den Vorteil, dass eine sehr hohe Empfindlichkeit der Detektoren und eine sofortige „Entwicklung“ der Röntgenaufnahme mit einer Darstellung auf dem Bildschirm zur weiteren Bearbeitung möglich ist.

Flachdetektor

Der verwendete Flachdetektor (Abbildung 124) der Firma Agfa (Typ "DirectRay am-Se" DDA digital detection array) hat die Abmessungen 2300 x 3000 Pixel und eine Auflösung von 139 µm und benötigt zum Betrieb eine Steuereinheit und einen PC.

Speicherfolie

Das Speicherfoliensystem Lumisys ACR2000 (Inc. Sunnyvale, CA, USA, Speicherfolie: Fujifilm ST-V_N) mit einer Detektorfläche von 35,4 cm x 43,0 cm ermöglicht eine stromquellenunabhängige Messung, benötigt nur zum Einlesen der Rohdaten ein stromabhängiges Lesegerät.

A.3.2.3 Datenverarbeitung, Mehrfachenergie-Verfahren (Dual-Energy) und automatische Fehlererkennung

Wie bereits beschrieben werden die Röntgenaufnahmen entweder digital eingelesen oder liegen vom Detektor bereits als digitales Bild vor. Diese Bilder konnten nun als Intensitätsverteilung in Graustufen dargestellt werden, wobei der „geschwärzte“ Bereich einem Areal hoher Intensität entspricht.

Datenverarbeitung

Durch eine digitale Bildnachbearbeitung (Hochpass-Filterung, Kantenanhebung) konnten die Radiographien detailreicher dargestellt werden. Dafür wurde von Herrn Dr. Osterloh ein Filteralgorithmus entwickelt, der auf der Fouriertransformation beruht. In den bearbeiteten Bildern heben sich Kanten und Risse deutlicher von ihrer Umgebung ab, während großflächige Hell-Dunkelunterschiede ausgeglichen werden [DGZfP, 2004]. Das Ergebnis der Filterung kann im Vergleich von Abbildung 133 und Abbildung 134 an Hand einer Röntgenaufnahme einer Kiefernholzscheibe ohne und mit Filterung verglichen werden.

Mehrfachenergie-Verfahren (Dual-Energy)

Mit dem Mehrfachenergie-Verfahren („Dual-Energy“) lassen sich radiographisch Materialunterschiede in einem Probekörper feststellen. Im Prinzip werden dabei zwei oder mehrere Aufnahmen von einem Probekörper mit unterschiedlichen Strahlungsenergien bei unveränderter Geometrie durchgeführt [ALOIA 1999, ENGLER, 1990] und mathematisch überlagert. Allgemein bekannt ist dieses Verfahren von der Gepäckprüfung am Flughafen.

Für die Auswertung mit Dual-Energy ist Röntgenstrahlung mit unterschiedlichen Anteilen von Röntgenstrahlung im Photonen- und im Comptonbereich notwendig. Bei höheren Energien überwiegt nur noch der Comptonanteil und Dual-Energy ist nicht möglich. Deshalb sind Untersuchungen mit der Blitzröhre XRS-3 mit 300 kV schwierig, da nur mit spektraler Aufhärtung gearbeitet werden kann und dadurch hoch- und niederenergetische Bereiche unzureichend aufgetrennt werden. Besser geeignet ist eine Röhre mit niedriger Spannung und sehr hohem Anteil an niederenergetischer Strahlung Weichanteil (Be-Fenster). Eine nachfolgende Division der beiden Bilder ermöglicht Materialunterschiede farblich kodiert darzustellen. Diese Farben können dann mit der ursprünglichen Intensität der Radiographie überlagert werden.

Dual-Energy wird z. B. zur Ortung von Fremdsubstanzen (Kapitel A.4) und Dichteunterschieden verwendet.

Datenverarbeitung

Mit einer automatischen Fehlererkennung können Inhomogenitäten in der Struktur des Holzes, die durch Schäden verursacht werden, leichter erkannt werden. Ein kommerzielles

Programm zur automatischen Detektierung von Fehlern in Aluminiumussteilen von der Firma YXLON wurde an Röntgenmessungen eines Eichenbalkens mit Schäden (Abbildung 127, Abbildung 140) angewendet und ergab Abbildung 128 und Abbildung 141, wobei die Inhomogenitäten mit roten Punkten markiert sind. Somit ist es mit diesem Programm einfacher, in den Röntgenaufnahme Bereiche mit Inhomogenitäten zu finden, die ein Indiz für Schadstellen sind.

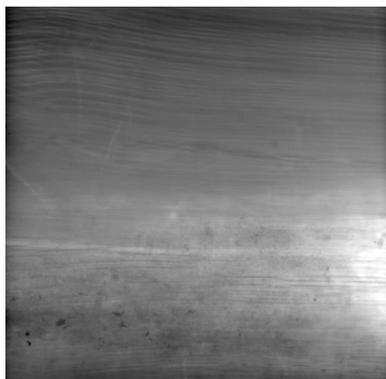


Abbildung 127: Röntgenaufnahme mit 110 kV, 9 mA, von Eichenbalken aus der Marienkirche Wittenberg (Röhre: Y.TU-160-DO05 YXLON Detektor: Perkin Elmer RID512-400 (Dr. Bavendiek)

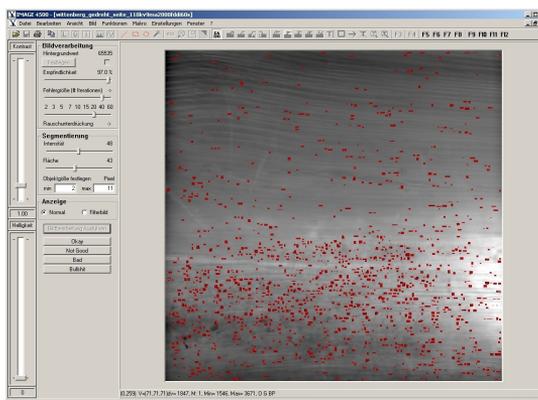


Abbildung 128: Abbildung links mit Programm zur automatischen Fehlererkennung von Fehlern in Aluminiumussteilen, rote Punkte markieren Inhomogenitäten in der Holzstruktur (Dr. Bavendiek)

A.3.3 Ergebnisse der Röntgenmessung an Holz

Folgend werden die Ergebnisse der Röntgenmessungen an trockenem bzw. feuchtem Holz vorgestellt. Weitere Ergebnisse zu Röntgenuntersuchungen als Verfahrenskombination mit anderen Verfahren können Kapitel 9 entnommen werden. Dabei wurde besonders die Röntgenblitzröhre angewendet, da damit eine mobile Untersuchung möglich ist. Trotz der weiten Verbreitung in anderen Bereichen sind keine Veröffentlichungen über Untersuchungen an Holz bekannt.

A.3.3.1 Trockene Holzkörper

Die Röntgenmessungen an trockenen Holzkörpern wurden an ungeschädigtem und geschädigtem, unverbautem (Bäumen) und verbautem, bereits selektiertem Holz (Bauteilen), durchgeführt:

Ungeschädigter Baum (Nadelholz)

Um die später gezeigten Schäden besser erkennen zu können wird zu Beginn eine Aufnahme von einem ungeschädigten Fichtenprobekörper gezeigt. Die Aufnahme wurde Abbildung 126 entsprechend durchgeführt und ergab die in Abbildung 129 (ungefiltert) und in Abbildung 130 (gefiltert) dargestellten Röntgenbilder.



Abbildung 129: Röntgenaufnahme eines ungeschädigten Fichtenkörpers, (Röntgenblitzröhre, 300 kV, 99 Impulse).

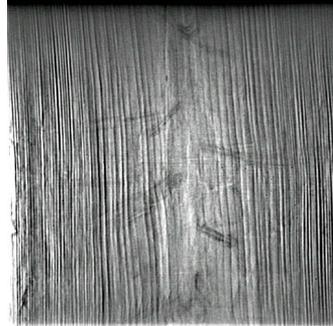


Abbildung 130: Aufnahme wie links, gefiltert mit Hochpassfilter, unterschiedliche Struktur der Jahrringe

In der Röntgenaufnahme sind die tangential durchstrahlten Jahrringe und Äste gut zu erkennen. Der dunkle Bereich in Abbildung 129 ist auf die Intensitätsverteilung der Blitzröhre zurückzuführen.

Fäulnisgeschädigte Baumscheibe aus Nadelholz

Die in Abbildung 131 und Abbildung 132 abgebildete Kiefernholzscheibe (D = 40 cm) zeigt deutliche Schäden durch Kernfäule, die bis zum Bruch des Baumes führen kann.



Abbildung 131: Draufsicht der Röntgenaufnahmeanordnung einer trockene Kiefernholzscheibe (links Detektor, rechts Blitzröhre).



Abbildung 132: Kiefernholzscheibe (aufgesägt in Strahlrichtung der Röntgenmessung)

Die Röntgenaufnahmen mit der Blitzröhre sind in Abbildung 133 in Negativdarstellung abgebildet.

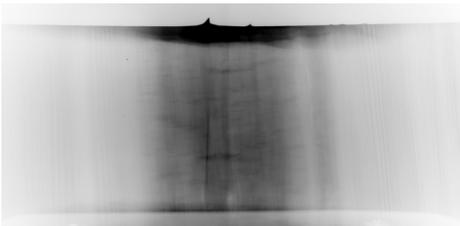


Abbildung 133: Röntgenaufnahme mit 99 Impulsen an trockener Kiefernholzscheibe mit Kernfäule in Negativdarstellung

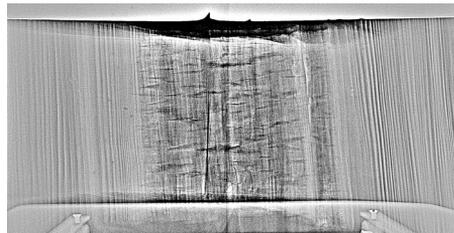


Abbildung 134: Aufnahme wie links, gefiltert mit Hochpassfilter, unterschiedliche Struktur der Jahrringe und Kernfäule deutlich zu sehen

Der dunkle Bereich in der Mitte der Aufnahme weist auf eine höhere empfangene Intensität als der Außenbereiche hin, was auf einen Substanzverlust hindeutet, der als Schädigung gedeutet werden kann. Ein Nachbearbeiten der Röntgenaufnahme mit der eingangs beschriebenen Bildbearbeitung ergibt Abbildung 134. In diesem Bild ist ein Unterschied zwischen dem Außenbereich mit deutlicher Jahrringstruktur mit dem Frühholz-Spätholzwechsel und dem Kernbereich, der durch Kernfäulnis keine Jahrringstruktur mehr aufweist, deutlich sichtbar.

Geschädigte Baumscheibe aus Laubholz

Zum Vergleich zu den Nadelbäumen wurden auch Untersuchungen an Laubhölzern durchgeführt. Bereits der Blick auf die aufgesägte Baumscheibe in Abbildung 135 zeigt, dass hier geringere Unterschiede zwischen dem hellen Frühholz und dem dunklen Spätholz als bei dem Kiefernholz (Abbildung 132) bestehen.



Abbildung 135: aufgesägte, trockene Laubholzscheibe mit Kernfäule, hellem Frühholz und dunklem Spätholz der Jahrringe

Auch die Röntgenaufnahmen mit der Röntgenröhre Isovolt 320/13 bestätigen, dass diese geringeren Kontrastunterschiede als bei Kiefer auch bei der Absorption widerspiegeln (Abbildung 136, Abbildung 137). Der geschädigte Bereich ist hier fast nicht über die, von der Schädigung verursachte, geringere Absorption zu erkennen (Abbildung 136). Mit einer alleinigen Auswertung der Absorption ist es hier nicht möglich, die ausgeprägte Schädigung durch Kernfäule darzustellen. Erst nach der Hochpassfilterung wird die Schädigung durch die unterschiedlichen Strukturen sichtbar.

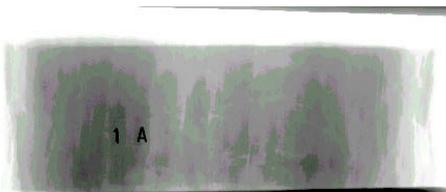


Abbildung 136: Röntgenaufnahme mit 99 Impulsen an trockener Laubholzscheibe in Negativdarstellung

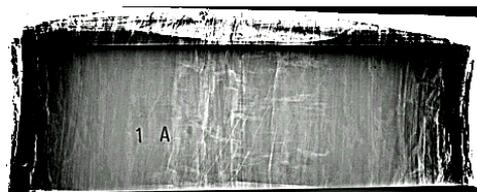


Abbildung 137: Aufnahme wie (Abbildung 136), gefiltert mit Hochpassfilter, geschädigter innerer Bereich trotz Filterung schwer erkennbar.

Ergebnisse zu Untersuchungen an einem Laubholzstamm mit innerer Hohlstelle oder Fäule am Astansatz können [HASENSTAB, 2004 (3)] entnommen werden.

Bauteile

Nachdem es möglich war, Schäden in trockenen Baumteilen zu detektieren wurden Untersuchungen an Bauteilen mit dem Ziel durchgeführt, auch hier Schäden zu finden. Exemplarisch wird hier die Untersuchung an einem ausgebauten Eichenbalken der Marienkirche in Lutherstadt- Wittenberg (Abbildung 138) vorgestellt. Weitere Messungen an Bauteilen werden in Kapitel 9 beschrieben.

Zusätzlich zur Blitzröhre wurde eine permanentstrahlende Röntgenröhre von YXLON verwendet, mit der Röntgenaufnahmen in Echtzeit möglich sind. Dabei sollte untersucht werden, ob mit dieser Röhre und einem anderen, hoch empfindlichen Detektor, eine bessere Auflösung erzielt werden kann und ob Inhomogenitäten im Holz mit einem Programm zur automatischen Fehlererkennung markiert werden.



Abbildung 138: Messanordnung bei Durchstrahlung eines ausgebauten Eichenbalkens aus der Stadtkirche in Wittenberg

Abbildung 139 zeigt das Röntgenbild, welches mit der Blitzröhre durchgeführt und anschließend mit der Hochpassfilterung nachbearbeitet wurde. Die Röntgenaufnahme zeigt, dass im linken und mittleren Teil des Balkens die Jahrringstruktur klar zu erkennen ist. Im rechten Teil der Aufnahme fällt ein Bereich mit veränderter Struktur auf, der dem fäulnisgeschädigten Areal zugeordnet werden kann.

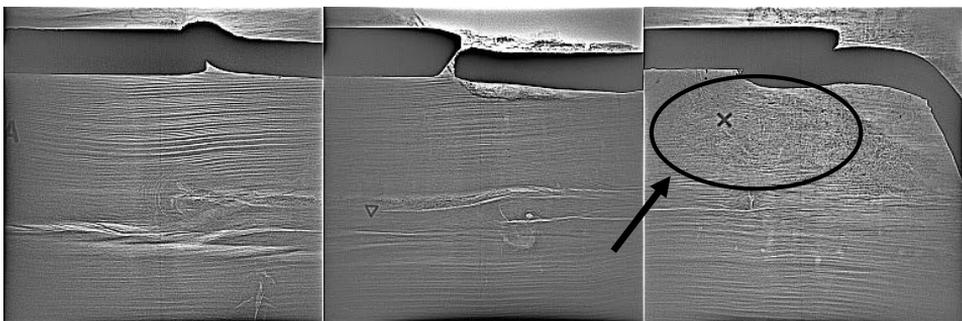


Abbildung 139: Röntgenbild des Eichenholz balkens (D=26cm) der Marienkirche nach Hochpassfilterung (Blitzröhre, 99 Impulse, 300 kV) mit Fäulnisschaden im Bereich der Pfeilspitze

In Abbildung 140 ist eine Aufnahme mit der Röntgenröhre Y.TU-160-DO05 YXLON und einem sehr viel empfindlicheren Detektor (Perkin Elmer RID512-400) zu sehen.

Hier scheint es zu einer Zunahme der Bereiche veränderter Struktur von der linken zur rechten Hälfte der Aufnahme zu kommen, dennoch ist das Erkennen der geschädigten Bereiche schwierig.

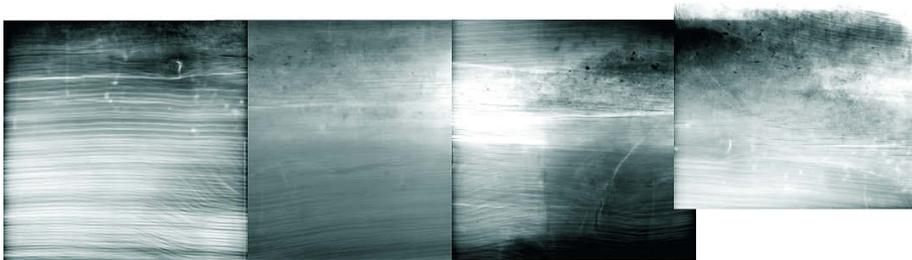


Abbildung 140: Röntgenaufnahmen von Eichenbalken aus der Marienkirche Wittenberg mit 110 kV, 9 mA, von (Röhre: Y.TU-160-DO05 YXLON Detektor: Perkin Elmer RID512-400 (Dr. Bavendiek)

Um geschädigten Bereiche für das ungeübte Auge besser darzustellen wurden die Röntgenaufnahmen mit einem Programm zur automatischen Fehlererkennung der Firma YXLON bearbeitet. Obwohl das Programm zur Detektierung von Fehlern bei Aluminiumussteilen optimiert ist, konnten damit von Herrn Dr. Bavendiek die Inhomogenitäten in der Holzstruktur deutlich hervorgehoben werden.

In Abbildung 141 sind die Inhomogenitäten in der Holzstruktur mit roten Punkten besonders markiert und erregen so die Aufmerksamkeit des Betrachters.

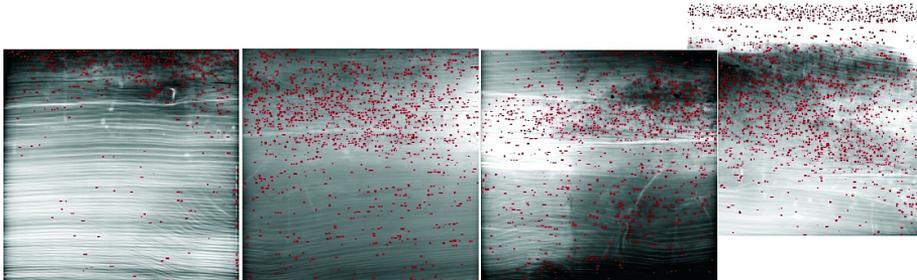


Abbildung 141: Abbildung oben mit Programm zur automatischen Fehlererkennung von Fehlern in Aluminiumussteilen, als rote Punkte markieren Inhomogenitäten in der Holzstruktur (Dr. Bavendiek)

Somit ist es möglich mit einem Programm zur automatischen Fehlererkennung die Bereiche der Inhomogenitäten für den ungeübten Betrachter deutlicher darzustellen. Ein Vergleich der Röntgenbilder Abbildung 139 und Abbildung 140 zeigt, dass auf der zweiten Aufnahme eine größere Anzahl von Schäden zu sehen ist. Dies hat aber auch damit zu tun, dass die Auflösung des Detektors für Abbildung 140 sehr viel besser ist. Zudem war der Abstand zwischen der Röhre und dem Balken für Abbildung 140 höher und es konnte der gesamte Bereich des Probekörpers abgebildet werden. So wurden Schäden im oberen Bereich mit der Blitzröhre versuchsbedingt nicht erfasst.

A.3.3.2 Holz mit höherer Feuchte

Wasser in Holz verursacht eine erhöhte Absorption der Röntgenstrahlung. Um diesen Einfluss bei den Messungen besser einschätzen zu können wurden Untersuchungen an trockenen Fichtenkanthölzern (10 cm x 10 cm) mit Bohrungen zum Einbringen von Feuchtigkeit durchgeführt. Dabei wurde bei einem Holzkörper die Bohrung mit Sägespänen gefüllt und anschließend mit Wasser begossen, bei dem anderen Holzkörper die leere Bohrung mit Wasser befüllt. Die Röntgenaufnahmen der Kanthölzer mit der Blitzröhre sind ungefiltert in Abbildung 142, gefiltert in Abbildung 143 dargestellt.

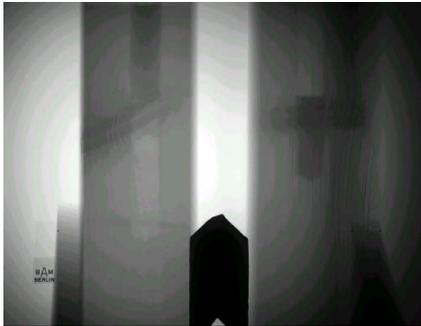


Abbildung 142: Röntgenaufnahme mit Blitzröhre von Fichtenkanthölzern mit Bohrungen, links gefüllt mit Sägespänen, rechts leer, beide mit Wasser befüllt

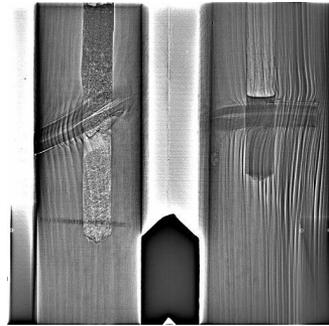


Abbildung 143: Hochpassfilterung von Abbildung links. Deutlich zu erkennen die erhöhte Absorption sowohl durch das Wasser in der rechten Bohrung als auch durch die nassen Sägespäne

Beide Aufnahmen zeigen, dass das Wasser sowohl in den Sägespänen als auch in der leeren Bohrung als Bereich starker Absorption zu erkennen ist.

Praktisch bedeutet dies, dass bei einem Bereich höherer Absorption nicht automatisch auf eine Holzsubstanz mit hoher Dichte oder einen ungeschädigten Bereich geschlossen werden kann. Diese sehr ernstzunehmende Schwierigkeit kann durch die Auswertung der Struktur umgangen werden und eine Anwendung der Hochpassfilterung ist erforderlich. In der Praxis kann bei einer deutlichen Struktur der Jahrringe von einem ungeschädigten Bereich ausgegangen werden.

Messeinsatz Horstwalde (Wald)

Nach den Voruntersuchungen sollte jetzt im Wald getestet werden, ob auch an stehenden Bäumen Schäden geortet werden können. Zu diesem Zweck wurden auf dem Freiversuchsgelände der BAM in Horstwalde zwei Kiefern, eine geschädigte und eine ungeschädigte, ausgewählt, die später platzbedingt gefällt werden mussten. Die verwendete Apparatur (Abbildung 144) bestand aus der batteriebetriebenen Blitzröhre (GE XRS-3) und dem Flachdetektor (Typ "DirectRay am-Se"), der eine sofortige Auswertung der Aufnahmen mittels PC ermöglichte (Abbildung 145).



Abbildung 144: Messung mit Blitzröhre (300 kV) und Flachdetektor auf dem Feiversuchsgelände der BAM in Horstwalde an Kiefer, die zur Verifizierung nach der Messung gefällt werden soll.



Abbildung 145: mobiles Auswertungslabor mit externer Stromversorgung.

In den Röntgenaufnahmen des Bereiches ein Meter über dem Wurzelansatz (Abbildung 146) zeigten sich bei beiden Bäumen keine Auffälligkeiten (Abbildung 147). Nach der Untersuchung wurden beide Kiefern gefällt und die Schnittflächen mit den Röntgenaufnahmen verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass auch visuell bei beiden Kiefern in diesem Bereich keine Schäden zu erkennen waren, obwohl eine Kiefer deutliche Krankheitsmerkmale aufwies. Leider ist es deshalb nicht möglich, ein Beispiel einer geschädigten Kiefer zu zeigen, da der noch ungeschädigte Bereich untersucht wurde und der geschädigte Bereich oben im Stamm liegt.



Abbildung 146: Messung mit Blitzröhre (300 kV) auf dem Feiversuchsgelände der BAM in Horstwalde an Kiefer, die zur Verifizierung nach der Messung gefällt werden soll

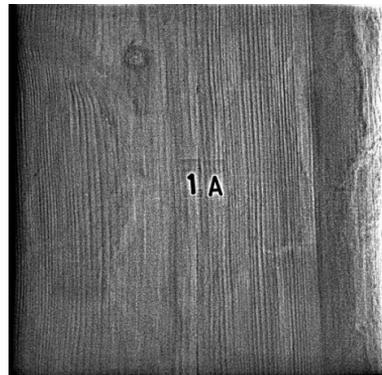


Abbildung 147: Röntgenaufnahme (99 Impulse) einer geschädigten Kiefer, mit keinen erkennbaren Schädigungen im Bereich der Aufnahme

Für weitere intensive Untersuchungen wurden mehrere Probekörper der geschädigten Kiefer zur BAM ins Labor transportiert. Folgend werden Ergebnisse der Untersuchungen an zwei ausgewählten Probekörpern dargestellt.

Abbildung 148 zeigt eine hochpassgefilterte Röntgenaufnahme eines mutmaßlich geschädigten Bereiches, Abbildung 149 die selbige Aufnahme mit Dual-Energy. Auf beiden Aufnahmen sind im Randbereich klare Jahrringstrukturen und im Kernbereich Areale mit Inhomogenitäten zu erkennen.

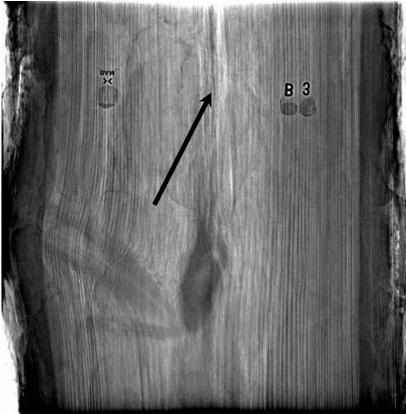


Abbildung 148: Röntgenaufnahme (150 kV, Isovolt 320) mit Hochpassfilterung von Kiefer mit Innenfäule, zu erkennen an Strukturauflösung im oberen Bereich (Pfeil)

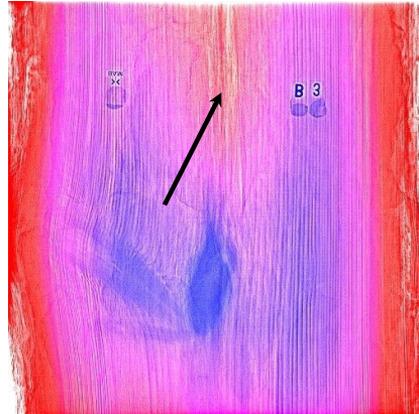


Abbildung 149: Röntgenaufnahme und Dual-Energy (berechnet aus hochenergetischer Aufnahme 150 kV mit 2 mm Cu und niedrig energetischer Aufnahme mit 60 kV) von Kiefer mit Innenfäule, zu erkennen an Strukturauflösung im oberen Bereich (Pfeil)

Um diese Untersuchungsergebnisse zu verifizieren wurden CT-Messungen in Auftrag gegeben. Diese wurden von Dr. Göbbels von der Abteilung I.4 der BAM mit dem Linearbeschleuniger (12 MeV Linac, Raytec) durchgeführt.

Aus dem Datensatz der CT-Messung (Abbildung 150) ist in (Abbildung 151) ein oberer und in Abbildung 152 ein unterer Radialschnitt zurückgerechnet worden.

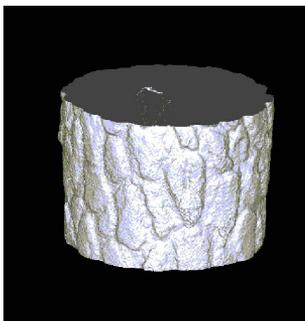


Abbildung 150: CT-Messung von Dr. Göbbels, BAM I.4 Schrägansicht von Kiefernstamm mit Linearbeschleuniger BAM I.4 (12 MeV Linac, Raytec)

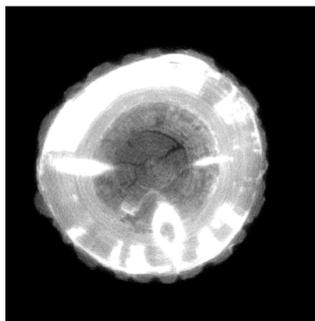


Abbildung 151: CT-Messung Radialschnitt von oberem Bereich geschädigter Kiefer mit Linearbeschleuniger

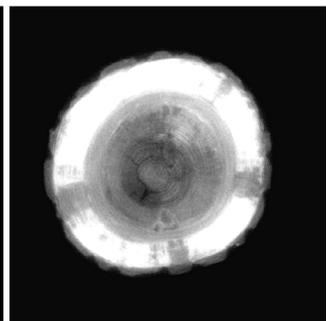


Abbildung 152: CT-Messung Radialschnitt von unterem Bereich geschädigter Kiefer mit Linearbeschleuniger

Die Vertikalschnitte Abbildung 153 und Abbildung 154 verlaufen mit Schnittrichtung horizontal bzw. vertikal zu Abbildung 151 und Abbildung 152.



Abbildung 153: CT-Messung:
Vertikalschnitt durch den untersuchten Stamm der geschädigten Kiefer mit Linearbeschleuniger, Schnittrichtung horizontal durch Abbildung 151 und Abbildung 152



Abbildung 154: CT-Messung:
Vertikalschnitt durch den untersuchten Stamm der geschädigten Kiefer mit Linearbeschleuniger, Schnittrichtung vertikal durch Abbildung 151 und Abbildung 152

Ein Vergleich der Röntgenaufnahmen mit den Vertikalschnitten der CT zeigen, dass der äußere, ungeschädigte Bereich im Röntgenbild sehr deutlich dargestellt werden kann. Die Kernfäule hingegen kann besonders deutlich im Radialschnitt der CT gezeigt werden.

Als zweites werden Röntgenmessungen eines Probekörpers mit einer Spechthöhle als gefilterte Durchstrahlung in Abbildung 155 und als Ergebnis einer Dual-Energy-Berechnung in Abbildung 156 dargestellt.



Abbildung 155: Röntgenaufnahme (150 kV) mit Hochpassfilterung von Kiefer mit Innenfäule und Spechthöhle, gesunder Bereich an ungeschädigter Jahrringstruktur am Rand zu erkennen

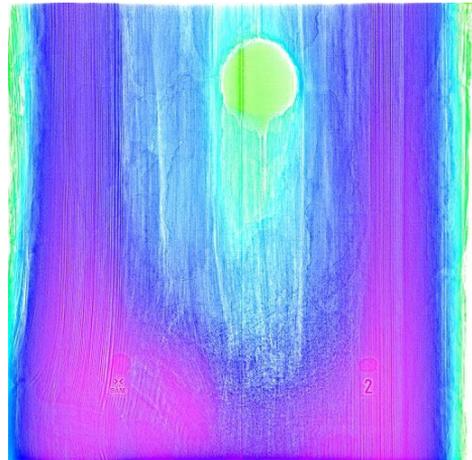


Abbildung 156: Röntgenaufnahme und Dual-Energy (berechnet aus hochenergetischer Aufnahme 150 kV mit 2 mm Cu und niedrig energetischer Aufnahme mit 60 kV) von Kiefer mit Innenfäule und Spechthöhle, gesunder Bereich an ungeschädigter Jahrringstruktur am Rand zu erkennen

Wie in den vorherigen Messungen lassen sich auch hier unterschiedliche Areale unterscheiden. So fallen hier geschädigte Bereiche, ein Spechtnest und ein gesunder, äußerer Bereich auf. Auch von diesem Baumstamm wurde eine CT-Messung durchgeführt (Abbildung 157). Davon sind in Abbildung 158 und Abbildung 159 Radialschnitte aus unterschiedlichen Höhen dargestellt.

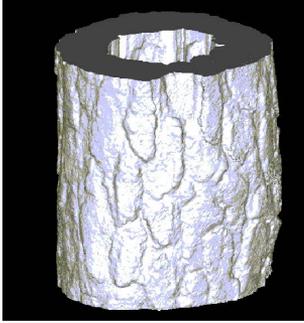


Abbildung 157: CT-Messung von Dr. Göbbels, BAM I.4, Schrägansicht von Kiefernstamm mit Spechthöhle mit Linearbeschleuniger BAM I.4 (12 MeV Linac, Raytec)

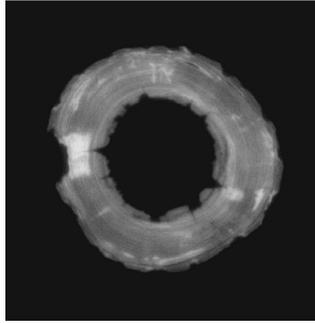


Abbildung 158: CT-Messung Radialschnitt von oberem Bereich geschädigter Kiefer mit Spechthöhle mit Linearbeschleuniger

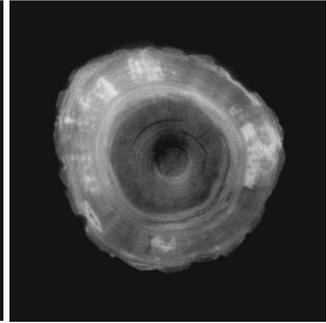


Abbildung 159: CT-Messung Radialschnitt von unterem Bereich geschädigter Kiefer mit Spechthöhle mit Linearbeschleuniger

Zur besseren Darstellung ist in Abbildung 160 ein Vertikalschnitt mit Schnittrichtung horizontal durch die radialen Bilder Abbildung 158 und Abbildung 159 dargestellt.

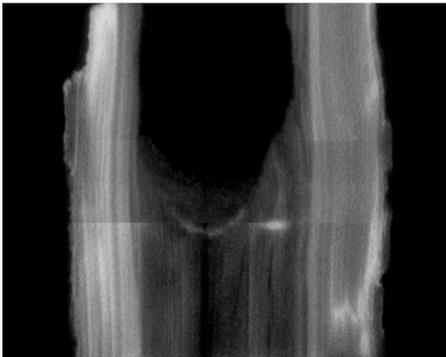


Abbildung 160: CT-Messung: Horizontalschnitt durch den untersuchten Stamm der geschädigten Kiefer mit Linearbeschleuniger, Schnittrichtung horizontal durch Abbildung 158 und Abbildung 159.

Mit diesen CT-Aufnahmen kann die Spechthöhle und das äußere, ungeschädigte Holz gut dargestellt werden.

Schlussfolgernd kann in einem Vergleich zwischen den Summationsbildern der Röntgenmessung und den CT-Aufnahmen gesagt werden, dass mit einer Durchstrahlung bei einer beginnenden Schädigung an feuchtem Holz Grenzen der Detektierbarkeit vorhanden sind. So stellte sich die, anhand der Röntgenaufnahme vermutet leichte Schädigung im oberen Bereich als in der CT-Aufnahme als Schädigung heraus, die im gesamten Bereich vorhanden ist und sich nach oben hin verstärkt. Hingegen ist es möglich ohne den Aufwand einer CT ausgeprägt Schädigung eindeutig zu detektieren.

A.3.4 Zusammenfassung und Diskussion der Röntgenergebnisse

In den Untersuchungen wird die Anwendbarkeit der Röntgenblitzröhre in Verbindung mit digitaler Radiographie zur Ortung von Ästen, Fremdkörpern und Hohlstellen sowie Fäule dargestellt. Durch den Einsatz der batteriebetriebenen, mobilen Blitzröhre in Verbindung mit digitaler Radiographie bei der durch die höhere Empfindlichkeit der Detektoren gegenüber Filmen geringere Röntgendosen benötigt werden, ist eine vielfältigere Anwendung mit geringeren Strahlenschutz-Sperrbereichen (10 m) möglich.

Die Aufnahmen wurden mit der Blitzröhre in einfacher Durchstrahlung durchgeführt. Um sich ein Bild über den Zustand des Bauteils zu machen, sind so mehrere Aufnahmen aus unterschiedlichem Winkel erforderlich. Die vor Ort durchgeführten Messungen wurden an der BAM unter Laborbedingungen mit konventionellen Röntgenröhren und CT-Aufnahmen wiederholt und bestätigt.

An trockenen Holzkörpern ist eine Ortung von Schäden eindeutig möglich. Untersuchungen an wassergefüllten Bohrungen in Holzkörpern ergaben eine sehr hohe Absorption und Streuung der Röntgenstrahlung durch Wasser, was beachtenswert ist, da feuchte Bereiche im Röntgenbild als Bereich großer Dichte -sprich viel Holzsubstanz- missverstanden werden können. Da Fäule häufig in Arealen hoher Holzfeuchte vorkommt, kann dies im Röntgenbild trotz Abbau der Holzsubstanz zu einer hohen Absorption führen.

Deshalb ist für die Ortung von Fäule die alleinige Untersuchung der Absorption unzureichend und es muss die Struktur des durchstrahlten Holzes beachtet werden. Dank der verwendeten Hochpassfilterung kann die Struktur des Holzes klar dargestellt werden. So ist nach unserem derzeitigen Kenntnisstand eine ungestörte Jahrringstruktur das sicherste Kriterium für einen ungeschädigten Probekörper, die aber besonders Schäden im Anfangsstadium überdecken kann (Anhang A.5.1). Ob mit Dual-Energy neben Fremdsubstanzen auch Fäule eindeutig geortet werden kann, wird weiter untersucht.

Es ist möglich, mit mobiler Radiographie und niedrig dosierter Röntgenstrahlung sowohl in feuchten und trockenen Baumteilen als auch an Holzbalken aus Nadelholz und Laubholz Kernfäule, Fäule und Insektenschäden zerstörungsfrei nachzuweisen. So wird eine dokumentierbare Schadensbeurteilung ermöglicht. Durch den Einsatz von Blitzröhren und die Verwendung von digitaler Radiographie wird eine hohe Mobilität gewährleistet und es ist auch eine schnelle Auswertung vor Ort möglich.

A.4 Beispiele für die Praxisanwendung von Ultraschallechoverfahren an Holzbauteilen

Das ehemalige Kloster Thierhaupten (Abbildung 161) liegt nördlich von Augsburg. In den Räumlichkeiten sind jetzt unter anderem vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege das Bauarchiv und die Restaurationswerkstatt untergebracht.



Abbildung 161:
Haupthaus des
Klosters
Thierhaupten

In und an diesem Bauwerk wurden umfangreiche Messungen durchgeführt. Dort erfolgten in Kooperation mit Herrn Saar, dem Leiter des Bauarchivs, Dipl.-Restaurator und Holz Sachverständigen, Messungen an praktisch relevanten Bauteilen. Die Ultraschallmessungen wurden teilweise zusammen mit Herrn Lutz von der TU Darmstadt durchgeführt. Das verwendete Ultraschall-Gerät wurde von Herrn Dr. Kroggel von der TU Darmstadt zur Verfügung gestellt und überbrückte so die Geräteengpässe an der BAM. Die vergleichenden Bohrwiderstandsmessungen wurden mit dem Gerät Resi 400 des Herstellers IML des Bauarchivs durchgeführt

Die folgenden Messungen werden in die Lösung von Prüfaufgaben in der Praxis und Untersuchungen der Bauteilabmessungen und Integrität unterschieden.

Da der Vergleich zwischen der Entwicklungsapparatur an der BAM mit dem Handgerät A1220 ähnliche gute Ergebnisse ergeben hatte (Kapitel 7.1.4) wurde das kleinere, batteriebetriebene Gerät vor Ort eingesetzt. Die verwendete Prüffrequenz war 55 kHz, was in Holz einer Wellenlänge von 2,5 cm entspricht und bedeutet, dass Schäden kleiner der halben Wellenlänge nur indirekt geortet werden können.

A.4.1 Lösungen von Prüfaufgaben im Praxiseinsatz

In der Bauhistorie diente das Obergeschoss des Klosters Thierhaupten zeitweise als Lager. Um mit den Pferdefuhrwerken den Oberboden (Stadel) zu erreichen, wurde an der Stelle des heutigen linken Tores (Abbildung 162) eine Rampe angebracht. Über die Räder der

Pferdefuhrwerke gelangte Feuchtigkeit und Erdreich in das Bauwerk, was zusammen mit Pilzsporen zu einer Schädigung des äußeren Balkens geführt haben könnte.



Abbildung 162: Wirtschaftsteil des Klosters Thierhaupten mit Position des untersuchten Balkens (Pfeil). Vor der Restaurierung war an dieser Stelle eine Rampe als Zugang zum Oberboden angebracht



Abbildung 163: Untersicht des Balkens

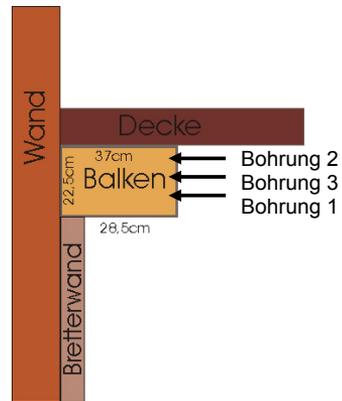


Abbildung 164: Skizze des Balkens mit der Position der Bohrungen mit dem Bohrwiderstandsmessgerät



Abbildung 165: Untersicht auf Balken mit Messlinien 1-5

Die genaue Lage des zu untersuchenden Balkens im Bauwerk kann Abbildung 163 und der Skizze (Abbildung 164) entnommen werden. Die Messungen wurden an einem Abschnitt des Balkens durchgeführt, der in einem Treppenhaus liegt. Dies hatte sowohl den Vorteil einer leichten Zugänglichkeit ohne Gerüst und erleichterte auch eine Überprüfung des Messergebnisses durch dreiseitige visuelle Zugänglichkeit des Balkens.

Ergebnis einer Messung entlang der vorderen Kante (Messlinie 1 in Abbildung 165) ist in Abbildung 166 dargestellt und zeigt über die gesamte Messung ein deutliches Rückwandecho. Die Bereiche mit einem örtlich begrenzten, schwachen Echo können durch Äste im Balken erklärt werden. Die sehr ausgeprägten Oberflächenwellen sind auf die starke Verstärkung und leichte Oberflächenschädigungen zurückzuführen.

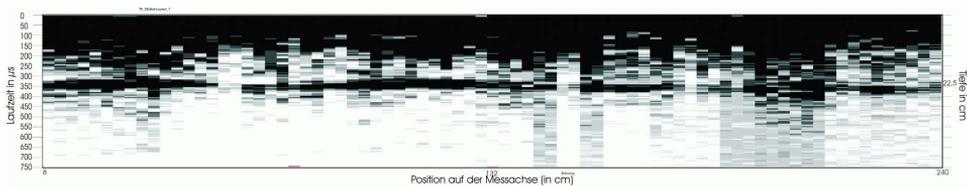


Abbildung 166: B-Bild entlang Balken (Messlinie 1 von 0 bis 240 cm) mit klarem Rückwandecho bei 350 µs, welches einer Bauteildicke von 22,5 cm zugeordnet werden kann.

Dazu parallel wurde eine Messung entlang der Wand (Messlinie 2) ausgewertet und ergab das in Abbildung 167 gezeigte B-Bild.

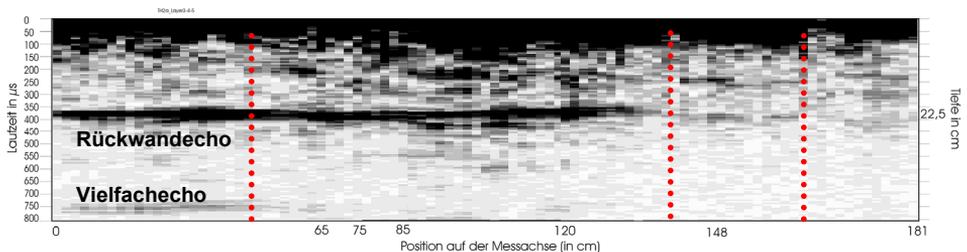


Abbildung 167: B-Bild entlang Balken (Messlinie 2 von 0 bis 181 cm) mit anfangs klarem Rückwandecho, später Abschattung der Rückwand durch Schädigung, als punktierte Linie die Lage der Messlinien 3 bis 5

Hier kommt es nach anfangs klarem Rückwandecho zu einer starken Dämpfung der Signale mit einer Abschattung der Rückwand. Dieses mehrmals verifizierte Ergebnis wurde mit einer zusätzlichen Messrichtung von der freien Balkenkante zur Wand (Abbildung 165) genauer untersucht.

Entlang Messlinie 3 aus Abbildung 165 ergab sich, wie erwartet, ein klares Rückwandecho über die gesamte Messstrecke (Abbildung 168). Das Ausbleiben der Oberflächenwelle an einem Messpunkt weist auf einen Schwindriss hin, der von der Messoberfläche ausgeht.

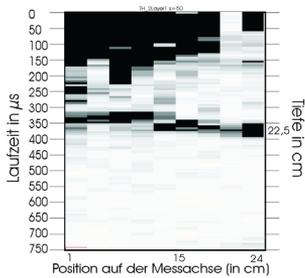


Abbildung 168: B-Bild der Messung entlang Messlinie 3 mit ungestörtem Rückwandecho

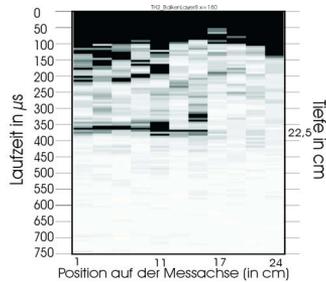


Abbildung 169: B-Bild der Messung entlang Messlinie 4 mit anfangs deutlichem Echo, später Abschattung durch Schaden

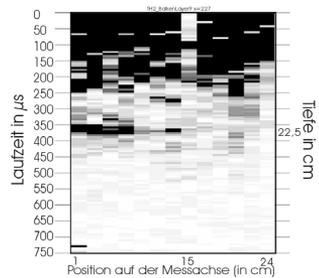


Abbildung 170: B-Bild der Messung entlang Messlinie 5 mit anfangs deutlichem Echo, später Abschattung durch Schaden

Eine Messung entlang Messlinie 4 ergab das B-Bild in Abbildung 169. Im Bereich der Messlinie 1 ist noch ein klares Rückwandecho zu empfangen, was sich im Bereich von Messlinie 2 verliert. Da es unter sonst gleichbleibenden Bedingungen zu einer Abschattung der Rückwand kommt, deutet dies hier auf eine Schädigung hin. Eine Messung entlang Messlinie 5 mit dem B-Bild in Abbildung 170 bestätigt dieses Ergebnis. Um genaue Informationen über die Ursache der Abschattung der Rückwand zu bekommen, wurden Messungen mit der Bohrwiderstandsmethode durchgeführt. Die Lage der Bohrungen sind in Abbildung 164 eingezeichnet. Dabei wurde erst eine Bohrung etwas oberhalb der Mitte des Balkens durchgeführt (Abbildung 171) bei der keinerlei Schädigungen detektiert werden konnten.

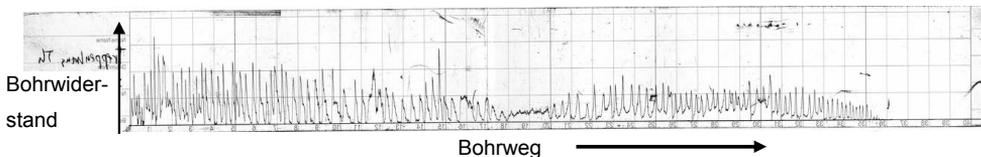


Abbildung 171: Bohrwidstandsmessung bei $x = 160$ cm und von der unteren Kante $z = 13$ cm (Bohrung 1 in Abbildung 164) zeigt ein Diagramm mit keinerlei Schäden. Die Jahrringe sind gut anhand der Zick-zack-Linie gut zu erkennen. Der Abstand der Karos ist 1 cm.

Eine weitere Bohrung am Rand des Balkens (Bohrung 2 in Abbildung 164) ergab das Bohrwidstandsdigramm in Abbildung 172. Bei dieser Messung fällt der Bohrwidstand nach der Hälfte der Bohrung stark ab, was eindeutig eine Schädigung durch Fäulnis bedeutet.

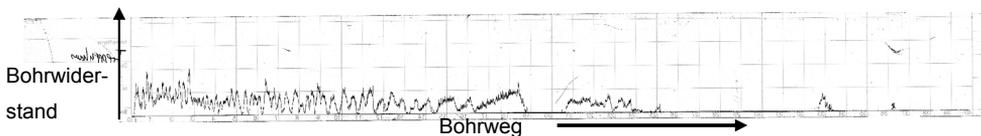


Abbildung 172: Bohrwidstandsmessung bei $x = 160$ cm und von der unteren Kante $z = 17,5$ cm zeigt anfangs keinerlei Schäden, später nimmt der Bohrwidstand jedoch ab, was auf eine Schädigung hindeutet.

Um zu untersuchen, bis zu welcher Tiefe die Schädigung reicht wurde noch eine Bohrung zwischen den beiden Bohrungen durchgeführt. Dieses Bohrwidstandsdigramm (Abbildung 173) zeigt eine ähnliche Schädigung wie die zuvor gezeigte Bohrung.

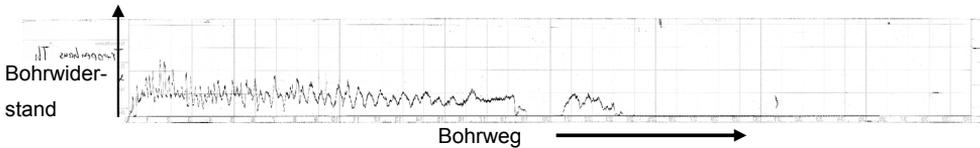


Abbildung 173: Bohr widerstands-messung bei $x = 160$ cm und von der unteren Kante $z = 15,5$ cm zeigt anfangs keinerlei Schäden, später nimmt der Bohr widerstand jedoch ab, was auf eine Schädigung hinweist.

Fazit:

Die deutlichen Echos und Vielfachechos der Messungen zeigen, dass mit der Ultraschallechomethode problemlos Balken mit einer Dicke von 22,5 cm untersucht werden können. Unter der Annahme, dass die Bereiche mit deutlichem Rückwandecho ungeschädigt sind und Bereiche mit einer Abschattung auf Schäden hinweisen können, wurde bei dem Balken ein Bereich detektiert, an dem weitere Messungen erforderlich sind. Mit der Bohr widerstandsmethode konnte eindeutig gezeigt werden, dass es sich hier um eine Schädigung durch Fäulnis handelt. Da der Balken inzwischen trocken ist, besteht keine weitere Gefahr durch Moderfäule.

Anhand dieses Beispiels konnte gezeigt werden, dass die Kombination des zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahrens mit der Bohr widerstandsmethode zu einer schnellen Lösung der Prüfproblematik führte.

A.4.2 Demonstrationen der Möglichkeiten zur Bestimmung von Bauteilabmessungen und Minderdicken

Untersuchung an Kloster Thierhaupten

Im allgemeinen wird die schönste und ungeschädigte Seite eines Bauteils als Sichtseite eingebaut. Besonders wenn Holz wiederverwendet wird ist nicht bekannt, ob eine Schwächung des Querschnitts durch Verkämmungen, Verzapfungen und Verblattungen durch die vorherige Konstruktion besteht. Zur Umnutzung ist die Information, ob Schwächungen vorhanden sind und welche Abmessungen bestehende Zapfenlöcher und Aussparungen haben, von großer Bedeutung.

Stütze mit Aussparung senkrecht zur Tragrichtung

In der Südscheune im Kloster Thierhaupten wurden Messungen an Stützen mit einer identischen Aussparung senkrecht zur Tragrichtung (Abbildung 174) durchgeführt. Die Ergebnisse sind als B-Bilder in Abbildung 175 oben (Stütze 1, 21,5 cm x 29,5 cm) und Abbildung 175 unten (Stütze 2, 23,5 cm x 29,5 cm) dargestellt. Einen Blick auf Abbildung 175 oben zeigt im linken Teil der Messung ein deutliches Rückwandecho, welches durch einen Ast geschwächt wird. Im rechten Teil der Messung ist ein schwaches Rückwandecho und ein Echo an einem Schwindriss zu sehen. Dass es sich hierbei um einen Schwindriss handelt, kann aus der Tiefenlage des Echos geschlossen werden, d. h. dass es sich um genau die Hälfte der Bauteildicke handelt. Zusätzlich kommt es zwischen 82 cm und 91 cm der Messlinie zu einer Abschattung der Rückwand, was genau der Lage der Aussparung entspricht. Der Grund, warum hier kein direktes Echo von der Aussparung zu sehen ist kann vielleicht mit ausgeprägten Inhomogenitäten in genau diesem Bereich erklärt werden.

Eine Messung entlang Stütze 2 (Abbildung 175 unten) ergibt Bereiche deutlicher Rückwandechos. Im Bereich ohne Rückwandecho sind sowohl ein Echo von einem Schwindriss als auch weitere deutliche Echos zu sehen. Diese Echos können mit der Tiefenachse eindeutig der Aussparung zugeordnet werden.

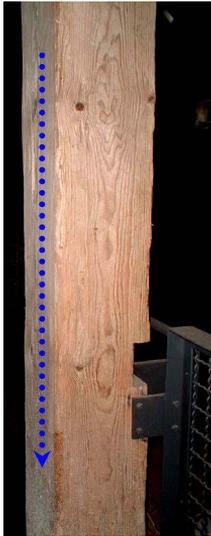


Abbildung 174:
Schrägsicht Stütze 1
(21,5 cm x 29,5 cm)
mit Aussparung
senkrecht zur
Tragrichtung und
Messlinie

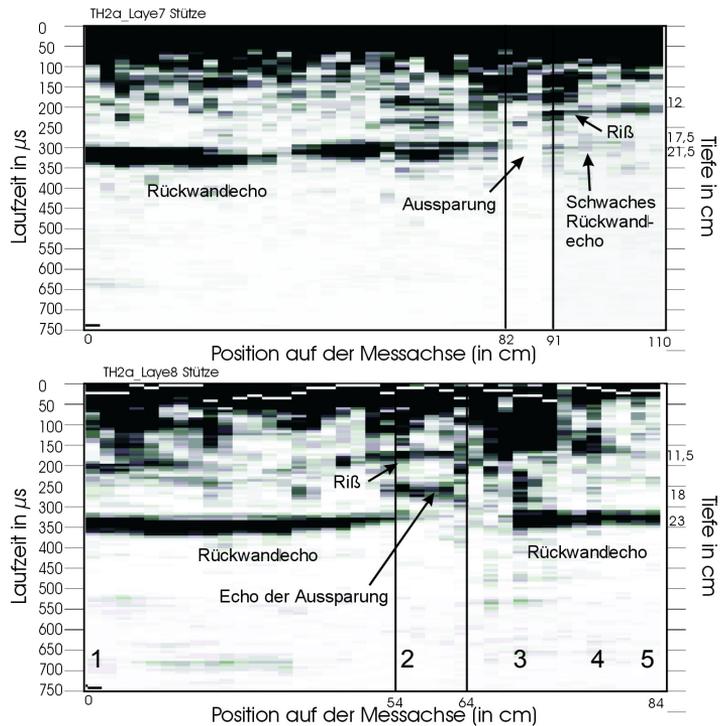


Abbildung 175:oben: B-Bild der Messung entlang Stütze 1 (21,5 cm x 29,5 cm) mit Echos an Bauteilrückwand, Schwindriss und fehlendes Echo bei Aussparung

unten: B-Bild der Messung entlang Stütze 2 (23,5 cm x 29,5 cm) mit Echos an Bauteilrückwand, Schwindriss und Aussparung, die Zahlen stellen die Lage der A-Bilder in Abbildung 176 dar.

In Abbildung 176 wird anhand beispielhaft gezeigter A-Bilder die Laufzeit- und Intensitätsunterschiede der einzelnen Reflektoren erläutert.

Mit den Messungen konnte gezeigt werden, dass Aussparungen senkrecht zur Tragrichtung von der Bauteilrückseite eindeutig geortet werden können.

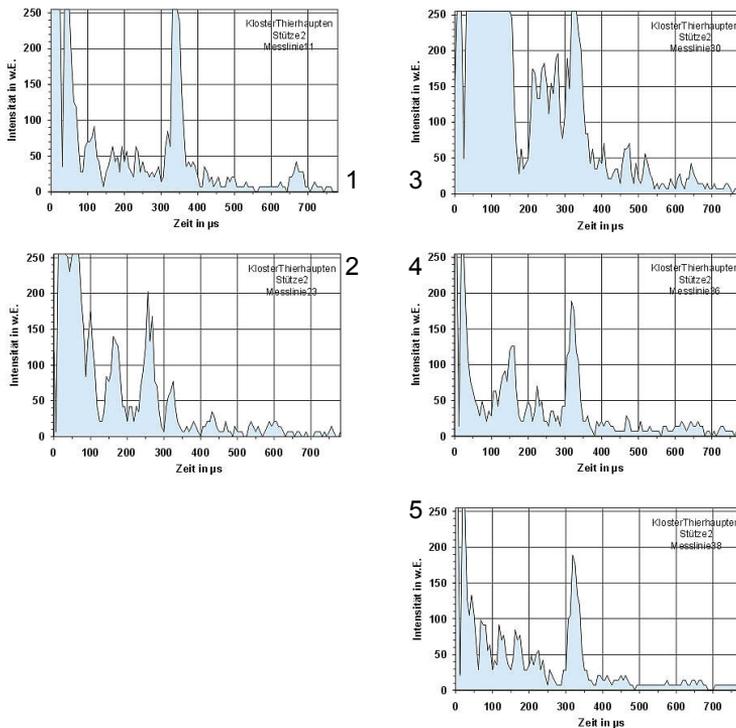


Abbildung 176: A-Bilder mit Position der Messlinie im B-Bild (Abbildung 175 unten)

In A-Bild links oben (Position 1) deutliches Rückwandecho

In A-Bild links (Position 2) Echo von Riss, Aussparung und schwaches scheinbares Rückwandecho, was durch große Prüfkopfbreite verursacht wird

In allen A-Bildern rechts ist die Rückwand zu erkennen, wobei bei Position 3 sowohl Oberflächenwellen als auch Echos von anderen Reflektoren zu sehen sind. Das A-Bild rechts mittig (Position 4) zeigt Echos vom Schwindriss und der Rückwand, das A-Bild rechts unten (Position 5) nur ein klares Rückwandecho.

Stützen mit Aussparung parallel zur Tragrichtung

Eine weitere Prüfaufgabe ist die Ortung von Aussparungen mit der Lage parallel zur Tragrichtung an Stützen. In Abbildung 177 ist die Zeichnung der Draufsicht einer Stütze zu sehen, in Abbildung 178 das zugehörige B-Bild, bei dem sowohl die Echos von den Aussparungen wie auch von der Rückwand zu sehen sind. Zum besseren Verständnis von Abbildung 178 sind die realen Bauteilabmessungen als punktierte, rote Linie eingezeichnet. Als blaue, punktierte Linie ist die Lage der A-Bilder (Abbildung 179, Abbildung 180, Abbildung 181) dargestellt.

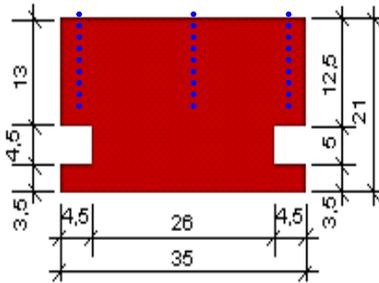


Abbildung 177: Draufsicht Stütze mit Aussparungen parallel zur Tragrichtung (Angaben in cm) und Lage der später dargestellten A-Bilder

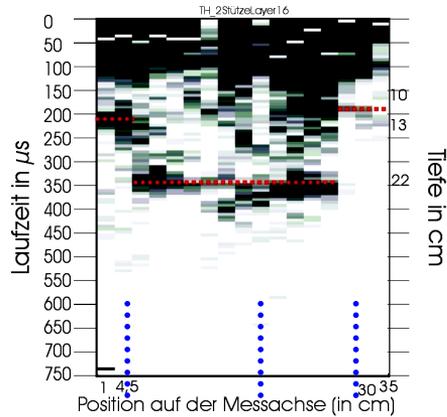


Abbildung 178: B-Bild einer Messung senkrecht zur Tragrichtung an Stütze (Abbildung 177) und gepunktete Linie der Lage der später dargestellten A-Bilder

Anhand der A-Bilder kann deutlich das Echo an der ersten Minderdicke (Abbildung 179), das Echo an der Bauteilrückseite (Abbildung 180) und das Echo an der zweiten Minderdicke (Abbildung 181) dargestellt werden.

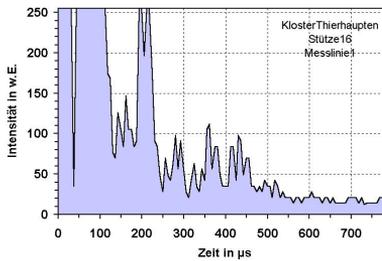


Abbildung 179: A-Bild aus der Messung Abbildung 178 bei Position 1 cm (ganz links) mit deutlichem Echo der Minderdicke

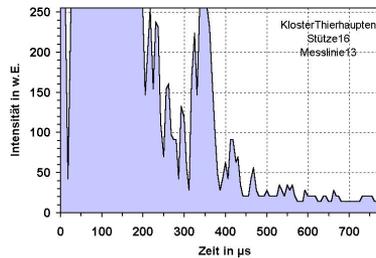


Abbildung 180: A-Bild aus der Messung Abbildung 178 bei Position 25 cm (etwa Mitte) mit deutlichem Echo der Rückwand

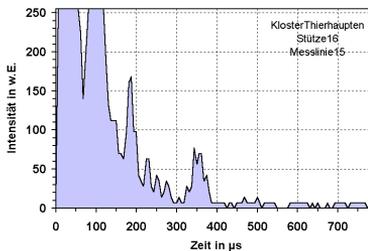


Abbildung 181: A-Bild aus der Messung Abbildung 178 bei Position 28 cm (erste Linie im Bereich der rechten Minderdicke) mit deutlichem Echo von Minderdicke und noch schwachem Echo von Rückwand

Eine Messung an derselben Stütze von der gegenüberliegenden Seite ergab in Bauteilmitte ein Rückwandecho in den Randbereichen wie erwartet kein deutbares Echo. Dies ist mit einer Überlagerung der Echos mit Oberflächenwellen zu erklären (siehe Kapitel 6.5.1).

Weitere Messungen an Stützen mit Aussparungen parallel zur Tragrichtung ergaben, dass eine Aussparung am Rand mit einer Breite von 3,5 cm und eine Tiefe von 2 cm bei einer Stützendicke von 21 cm detektiert werden konnte, eine Aussparung mit einer Breite von 2,5 cm dagegen nicht.

Minderdicke und Bauteilabmessung bei Sparrenstoß verbunden mit Holzdübeln



Abbildung 182: Kemptner Dach aus dem 17. Jahrhundert mit zwei Reparaturstellen, an denen Messungen mit Ultraschallecho durchgeführt wurden.

An einem Dachstuhl aus dem 17. Jahrhundert (Kemptner Dach) wird anhand von Anschauungsbeispielen praktisch gezeigt, wie Schäden an Holzkonstruktionen denkmalpflegerisch korrekt durch zimmermannsmäßige Reparaturen behoben werden können. Die Ergebnisse von Messungen mit Ultraschallecho an zwei solcher Reparaturstellen werden folgend vorgestellt.

In Abbildung 183 oben ist das B-Bild einer Messung entlang eines Sparrenstoßes, der mit Holzdübeln für Zugkräfte verbunden ist, (Abbildung 183 unten) zu sehen, auf dem ein deutliches Echo zu Beginn und zu Ende der Messungen zu sehen ist, welches eindeutig der Bauteildicke beider Bauteile zugeordnet werden kann.

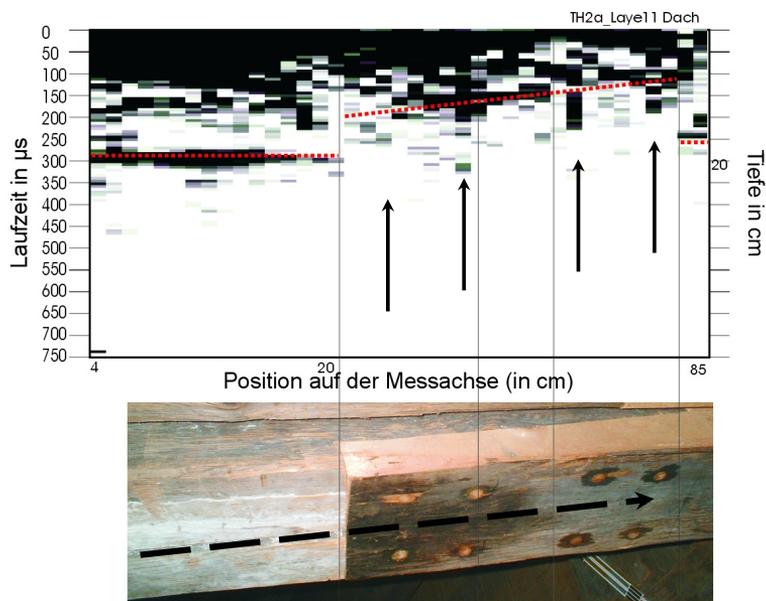


Abbildung 183: oben: B-Bild der Messung entlang der Oberfläche einer Reparaturstelle (gestrichelter Pfeil) mit eingeklebten Holzdübeln, reale Bauteilabmessungen als gepunktete rote Linie eingezeichnet. Echo an Bauteilrückwand und Störung durch eingeklebte Holzdübel

Zwischen diesen Bereichen mit vollem Querschnitt ist der Bereich des Stoßes und der schräge Verlauf des Holzes als Rückwandecho zu erkennen. Besonders auffällig sind drei Bereiche mit einer Breite von einer oder zwei Messkurven, in denen keine Rückwand sondern intensive Signale mit unterschiedlichen Laufzeiten empfangen werden. Diese Bereiche stimmen genau mit der Lage der Holzdübel überein. Dass es hier zu Störungen kommt liegt daran, dass die Homogenität des Holzes gestört ist und Bohrungen für die Holzdübel sowohl ein Ausbreiten des Schalls behindern, als auch selbst Reflexionen verursachen. Im Bereich zwischen dem Stoß der beiden Hölzer und dem ersten Paar Holzdübel ist kein Rückwandecho zu empfangen, da der Bereich für eine Wellenausbreitung zu schmal ist.

Die Messungen haben ergeben, dass es möglich ist, die Abmessungen der Bauteile zu bestimmen und die Lage von Holzdübeln zu orten, die heutzutage häufig so eingebaut werden, dass sie von außen an der Sichtseite nicht mehr zu sehen sind.

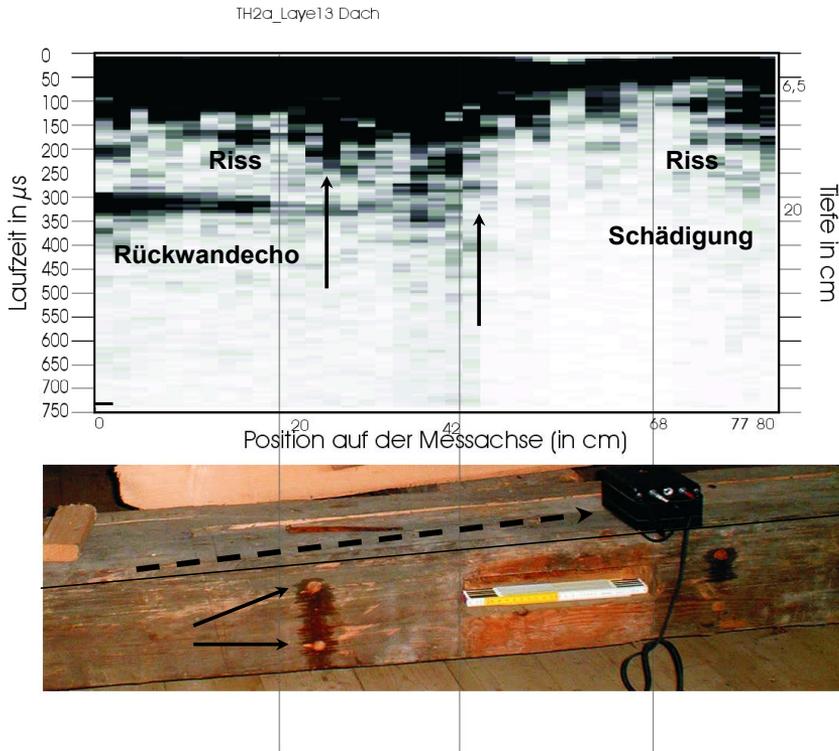


Abbildung 184: B-Bild von Messung entlang Reparatur an Sparren mit Holzdübeln; links mit deutlichem Rückwandecho an vollem Querschnitt, Auffälligkeit durch Holzdübel (linke Pfeile) und abgeschatteter Rückwand durch Aussparung (ab rechtem Pfeil) und Schädigung. Echos geringer Intensität durch Schwindriss.

Die Messung entlang des Balkens mit Holzdübeln senkrecht zur Messrichtung, Aussparung in geringer Tiefe und Schädigung durch Fäule ist in Abbildung 184 als B-Bild zu sehen.

Dabei ist eindeutig im ungeschädigten Bereich die Bauteilrückwand und ein Schwindriss zu erkennen. Die Lage der Holzdübel zeichnet sich durch einen Bereich mit intensiven Signalen verschiedener Laufzeiten ab. Bis zur Aussparung ist die Rückwand noch schwach zu erkennen. Die Aussparung selbst verursacht eine so geringe Bauteildicke, dass ein etwaiges Echo an der Aussparung durch Oberflächenwellen überlagert wird. Nach der Aussparung ist der Balken sichtbar durch Fäule zersetzt und somit wird die Rückwand abgeschattet.

A.4.3 Demonstrationen der Möglichkeiten zur Bestimmung der Integrität

Durch Konstruktionen, Einbauten oder den Bodenbelag kann die Zugänglichkeit von Holzbauteilen eingeschränkt sein. Wenn es dort beispielsweise durch ein Temperaturgefälle, fehlerhafte Dampfsperren oder Wasserschäden zu einer Durchfeuchtung des Holzes kommt, kann es die Entstehung von Fäulnis begünstigen. Betroffen sind sowohl Dächer als auch Geschossdecken. Folgend werden einige Beispiele an Sparrendächern und Deckenbalken vorgestellt.

Nachweis der Integrität bei Sparrendächern mit Außendämmung

Der größte Anteil der Sparren in Dächern mit Außendämmung ist dreiseitig zugänglich und belüftet. Damit ist der Zustand des Holzes immer gut überprüfbar und auf dem belüfteten Holz sind keine Feuchteansammlungen zu erwarten. Wie Abbildung 185 zeigt, gibt es aber auch andere Konstruktionen.

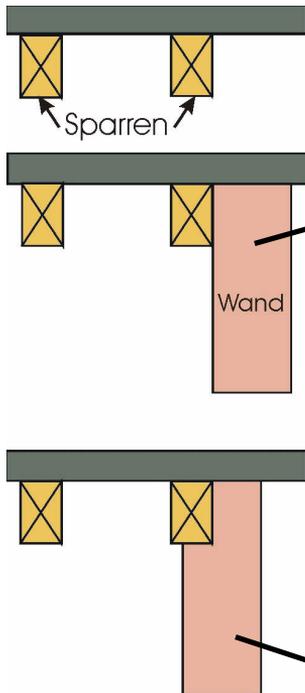


Abbildung 185



Abbildung 186



Abbildung 187

Abbildung 185: (links) Schematische Skizze der Lage von Sparren bei Dächern mit Außendämmung.

Oben: dreiseitige Zugänglichkeit der Sparren;

Mitte: Sparren liegt an Einbauten oder Mauer an: Zweiseitige Zugänglichkeit;

Unten: Sparren durch Einbauten oder Wand von drei Seiten eingehaust und so nur eine zugängliche Oberfläche

Abbildung 186: (rechts oben) Praxisbeispiel für zweiseitig zugänglichen Sparren an Mauer mit Messung der dünnen Bauteilrückwand ($b = 11 \text{ cm}$)

Abbildung 187: (rechts unten) Sparren effektiv nur einseitig zugänglich da in der Wand eingebaut

Besteht ein direkter Kontakt zwischen dem Holzbauteil und der Mauerwerkswand, kann es bei defekter oder nicht vorhandener Dampfsperre durch eine Taupunktverschiebung zu Tauwasserbildung kommen [BLAICH, 1999]. Dies führt möglicherweise bei ungenügender Durchlüftung zu einer Wasseransammlung, die zu einer Durchfeuchtung des Holzes führt und das Holz anfällig gegenüber den ubiquitären Pilzsporen macht. Solche Schäden von der nicht zugänglichen Bauteilrückseite können bei größerem Ausmaß die Stabilität gefährden.

Messung an einseitig zugänglichem Sparren mit Riss von der Rückseite

Der schwierigste Fall bei der Abschätzung eines Balkenzustandes ist folgend beschrieben. Hier handelt es sich um einen Sparren im Bad, der effektiv nur von einer Seite zugänglich ist. Eine Messung von der freien Oberfläche des Sparrens ist in Abbildung 188 gezeigt.

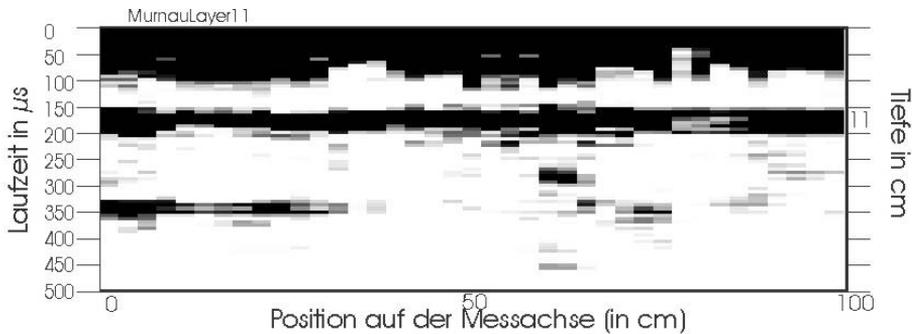


Abbildung 188: Messung entlang der zugänglichen Sparrenseite mit klarem Rückwandecho

Eine weitere Messlinie senkrecht dazu (Abbildung 189) ergab (Abbildung 190), die Informationen über die gesamte Breite des Sparrens liefert.



Abbildung 189: Messlinie auf Sparren mit einseitiger Zugänglichkeit im Bad

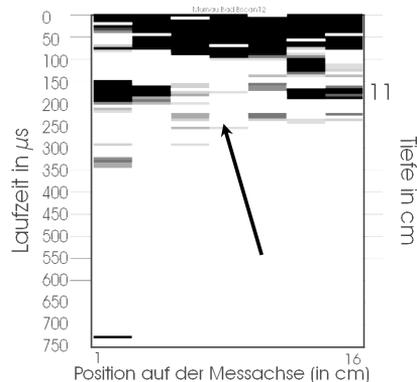


Abbildung 190: B-Bild der Messung an Sparren über die Bauteilbreite mit fehlenden Echo in Bauteilmitte (Pfeil) was ein Hinweis auf einen Schwindriss ist

Auffällig ist hier, dass neben den klaren Rückwandechos am Bauteilrand bei der Messposition in der Mitte (Pfeil) des Sparrens kein Echo zu empfangen ist. Aus Vergleichsmessungen an anderen Sparren ist bekannt, dass es sich hierbei um einen Riss von der Rückseite handeln könnte. Tatsächlich ergab eine genaue visuelle Untersuchung des Sparrens, dass der Sparren etwas aufgewölbt ist, was auf einen Riss von der Bauteilrückseite hindeutet. Ein möglicher Grund hierfür ist eine nicht vorhandene Dampfsperre zum trockenen Mauerwerk, die zu einem Feuchtigkeitsgefälle im Sparren zwischen dem feuchten Bad und der trockenen Wand führt. Werden die zulässigen Zugspannungen im Holz überschritten, kommt es so zu Schwindrissen. Diese Risse ermöglichen bei einer Durchfeuchtung mit einer etwaigen Infektion durch Pilzsporen ein besonders schnelles Ausbreiten von Fäule und so müssen bei Schadensfällen besonders solche Bereiche untersucht werden. Um die Ortung von Rissen mit Entstehung von der verdeckten Bauteilseite zu verbessern müsste das Verfahren weiterentwickelt und erprobt werden.

A.5 Vergleichende Verfahrenskombinationen zur Ortung von Schäden

A.5.1 Vergleichender Einsatz von Röntgen- und Ultraschallechomessungen an Sparren mit Innenfäule

Anhand eines Schadensfalls wird die Anwendung von Ultraschallecho- und Röntgenuntersuchungen an Balken aus Nadelholz vorgestellt.

Durch Vermittlung von Herrn Dipl. Ing. Flohr, einem Holzschutzsachverständigen, wurde die Sanierungsbaustelle eines barocken Wasserschlosses, Schloss Reinharz (Abbildung 191), südlich von Wittenberg, besucht.



Abbildung 191: Ansicht Wasserschloss Reinharz

Das Schloss aus dem 17. Jahrhundert wies am Dachstuhl erhebliche Schäden im Traufenbereich (Abbildung 192) auf, was zu einer Sanierungsmassnahme an etwa hundert, durch Fäulnis geschädigten, Balkenköpfen (Abbildung 193) führte. Verursacht wurden die Schäden durch eine defekte Wasserableitung, wodurch es zu einer Durchfeuchtung der Sparren kam. Da die Sparren besonders von Innenfäule betroffen waren, wurde die umfangreiche Schädigung erst bei den Sanierungsmaßnahmen in ihrem vollen Masse sichtbar. Indirekt verstärkt wurde die Innenfäule durch einen Schutzanstrich, der vor einigen Jahrzehnten äußerlich aufgebracht wurde und der Fäule danach im Inneren der Sparren ein ungestörtes Wachstum ermöglichte [FLOHR, 2002, mündliche Mitteilung].

Im Zuge der Sanierungsarbeiten (Abbildung 194) war es möglich, Probekörper mit Innenfäule für weitere Untersuchungen an der BAM direkt am Bauwerk auszuwählen. Folgend werden die Ergebnisse an zwei Probekörpern, REI02 und REI03, dargestellt, die beide im Bauwerk an den zugänglichen Oberflächen keine Schäden aufwiesen. Dabei sollte geklärt werden, ob mit Ultraschallecho- und Röntgentechnik die inneren Schäden geortet werden können. Zudem soll untersucht werden, ob bei Ultraschallecho mit einer Prüffrequenz von 33 kHz oder 55 kHz bessere Ergebnisse erzielt werden und ob mit der Blitzröhre mit 150 kV die Schäden besser als mit 300 kV dargestellt werden können.



Abbildung 192: Schaden am Dach in Traufbereich durch schadhafte Dachentwässerung

Abbildung 193: Detailansicht Sparren in Seitenansicht

Abbildung 194: bereits sanierter Bereich

Die hier gezeigten Ultraschallmessungen wurden an den grob behauenen oder gesägten Balken mit dem Transversalwellenprüfkopf A1220 durchgeführt. Mit den Longitudinalwellenprüfköpfen G 0,2 GC (Mittenfrequenz 100 kHz) konnten trotz optimaler Ankopplung mit Vaseline keine klaren Signale sondern nur Rauschen empfangen werden, dem keine Bauteilgeometrien zugeordnet werden konnten. Der hier verwendete Punktkontaktprüfkopf A1220 benötigt zur Ankopplung keine Koppelmittel und durch eine gefederte Lagerung der Prüfköpfe ist eine Ankopplung auch an unebenen Oberflächen möglich. Gemäss der in Kapitel 6 beschriebenen Vorgehensweise wurde der Prüfkopf mit einer Polarisation parallel zur Faser angekoppelt und mit 55 kHz ($\lambda = 2,5$ cm) bzw. 33 kHz ($\lambda = 4,2$ cm) angeregt. Die ausgeprägten Oberflächenwellen (Kapitel 6.5.1) sind von der Verstärkung des Signals abhängig und behindern die Messung nur bei oberflächennahen Reflektoren.

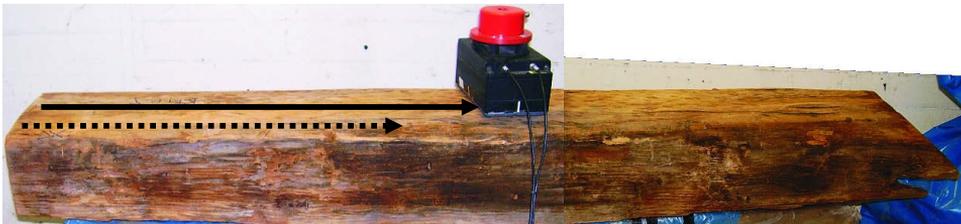


Abbildung 195: Messung an ausgebauten Balken REI02 mit Innenfäule (19,5 x 14 x 100 cm), der äußerlich an vier Oberflächen keine Anzeichen einer Schädigung aufwies aber von der Stirnseite zur Dachrinne teilweise hohl war. Als Pfeil dargestellt die Messlinien.

Der Sparren REI02 (Abbildung 195) wies nur an der Stirnseite zur Dachrinne hin Schäden auf, alle übrigen Oberflächen ließen keine Schäden vermuten. Eine Messung entlang des durchgezogenen Pfeils in Abbildung 195 ergab mit einer Mittenfrequenz von 33 kHz das B-Bild in Abbildung 196 und mit 55 kHz bei unveränderter Empfindlichkeit das B-Bild in Abbildung 197.

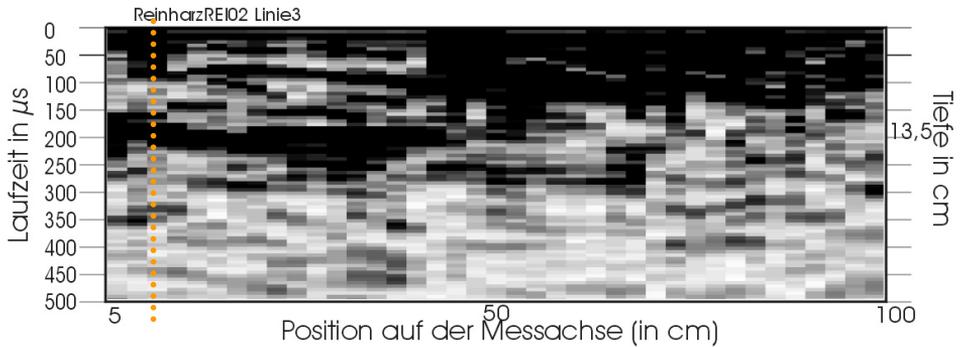


Abbildung 196: B-Bild einer Messung ($f = 33 \text{ kHz}$) entlang der Mitte des ausgebauten Balkens (durchgezogener Pfeil) REI02 mit Rückwandechos im linken Bereich, Abschattung der Rückwand ab 54 cm. Gepunktete Linie zeigt Bereich, der in einem A-Bild genauer dargestellt wird.

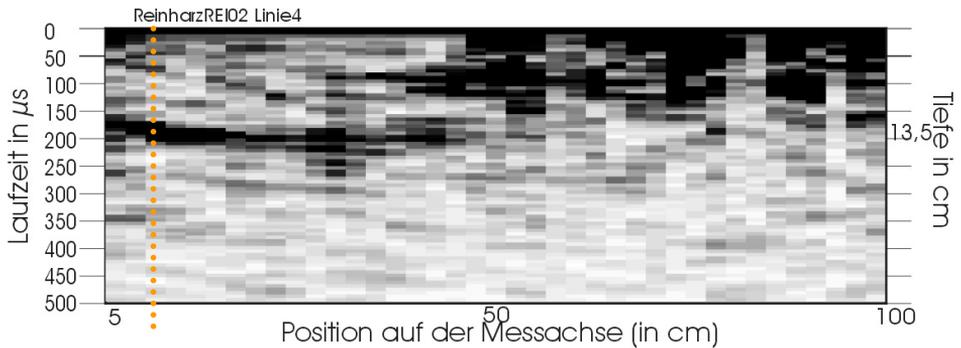


Abbildung 197: B-Bild einer Messung ($f = 55 \text{ kHz}$) entlang der Mitte des ausgebauten Balkens (durchgezogener Pfeil) REI02 mit Rückwandechos im linken Bereich, Abschattung der Rückwand ab 54 cm. Gepunktete Linie zeigt Bereich, der in einem A-Bild genauer dargestellt wird.

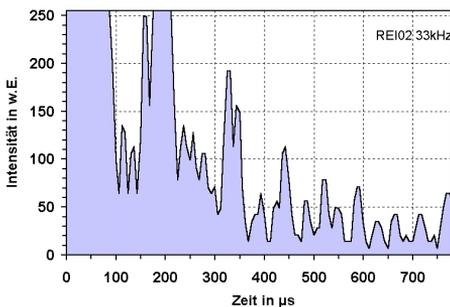


Abbildung 198: A-Bild der Messung mit 33 kHz an REI02 aus B-Bild (Abbildung 196) entlang gepunkteter Linie mit intensiven Oberflächenwellen und breitem Echosignal der Rückwand

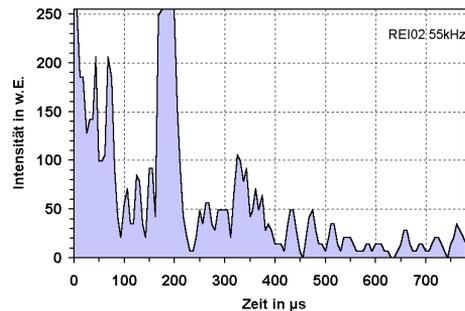


Abbildung 199: A-Bild der Messung mit 55 kHz an REI02 aus B-Bild (Abbildung 197) entlang gepunkteter Linie mit gering ausgeprägten Oberflächenwellen und schmalen Echosignal der Rückwand

Beide Messungen ergeben im linken Bereich bis etwa 54 cm ein deutliches Rückwandecho, dass dann von einem Bereich mit ausgeprägten Oberflächenwellen und einer abgeschatteten Rückwand abgelöst wird. Ein Vergleich beider Messungen mit unterschiedlichen Messfrequenzen kann besonders gut anhand von zwei A-Bildern aus einer Messposition gezeigt werden. Bei dem A-Bild mit einer Messfrequenz von 33 kHz (Abbildung 198) ist das empfangene Rückwandsignal durch das breitere Sendesignal und durch die geringere frequenzabhängige Dämpfung höher und breiter als bei dem A-Bild mit 55 kHz (Abbildung 199). Weiter sind bei der niedrigeren Frequenz die Oberflächenwellen stärker ausgeprägt.

Im geschädigten Bereich (rechts) werden bei der Messfrequenz von 33 kHz sehr viele Signale empfangen, im vergleichbaren Bereich in Abbildung 197 erfahren die höherfrequenten Signale eine stärkere Dämpfung.

Da die Rückwändechos bei einer höheren Frequenz mit einer geringeren Halbwertsbreite mit angezeigt werden, wird in den weiteren Versuchen mit der Prüffrequenz von 55 kHz gemessen (Kapitel 6).

Eine Messung entlang des Randes vom Probekörper REI02 (gepunkteter Pfeil in Abbildung 195) ergab, dass hier die Schädigung bereits nach 40 cm eine Abschattung des Rückwändechos verursacht (Abbildung 200).

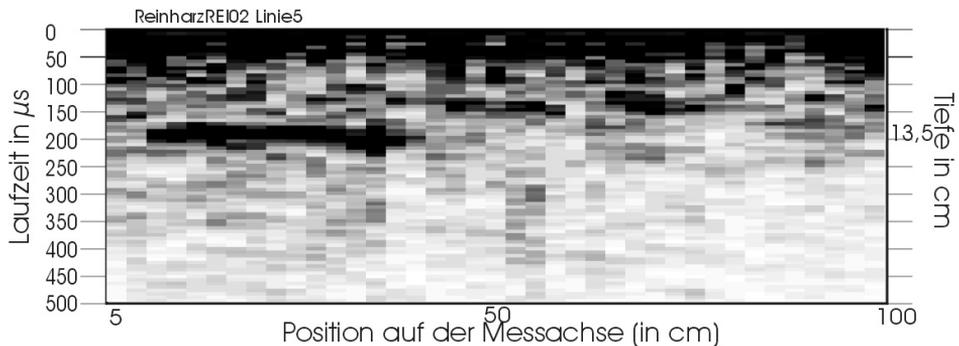


Abbildung 200: B-Bild einer Messung ($f = 55 \text{ kHz}$) entlang des Randes des ausgebauten Balkens REI02 (gepunkteter Pfeil in Abbildung 195) mit Rückwandechos im linken Bereich, Abschattung der Rückwand ab 40 cm und vereinzelte Echos an Riss, der planparallel zur Oberfläche verläuft

Nach den Ultraschalluntersuchungen wurde der Sparren REI02 mit Blitzröhren in Zusammenarbeit mit der Abteilung VIII.3 durchstrahlt. Abbildung 201 zeigt die hochpassgefilterten (Kapitel A.3.2.3) Ergebnisse der Durchstrahlung mit 300 kV, Abbildung 202 das Ergebnis der gleichen Messung mit 150 kV. Die Röntgenaufnahme der Draufsicht des Sparrens ist in Abbildung 203 zu sehen.

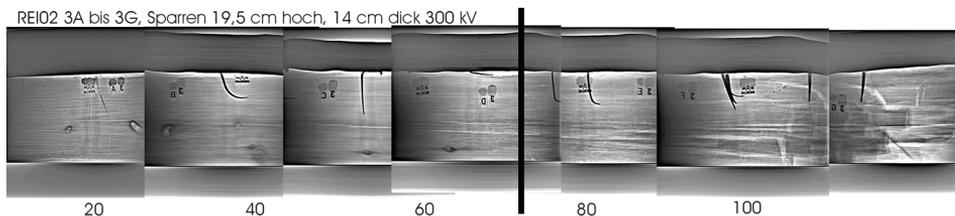


Abbildung 201: Röntgenaufnahme mit Hochpassfilterung von der Seite des Sparrens REI02 mit Blitzröhre (300 kV) zeigt deutlich die horizontalen Linien der Jahrringstruktur im ungeschädigten Bereich und die Auflösung derselben mit vertikalen Linien, d. h. die Schädigung, im rechten Bereich ab 65 cm (schwarze Linie).

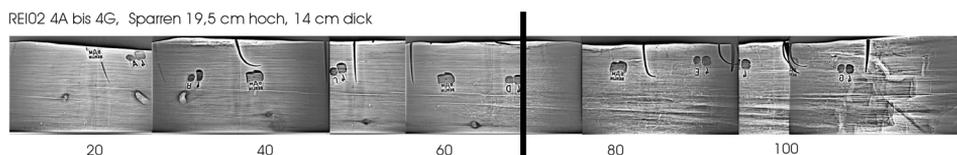


Abbildung 202: Röntgenaufnahme mit Hochpassfilterung von der Seite des Sparrens REI02 mit Blitzröhre (150 kV) zeigt Schädigung im linken Bereich bis 65 cm. Die Zahlen stellen den Abstand zum rechten, ungeschädigten Rand in Zentimeter dar.

Auf den Röntgenaufnahmen fallen zu aller erst historische Nägel und die Zahlen der Bleimarken auf. Zudem sind Risse als helle Linien und Äste als dunkle Punkte sowie die horizontale Jahrringen zu erkennen, die durch die unterschiedliche Absorption von Früh und Spätholz entstehen. Im rechten Teil der Abbildung fallen Bereiche mit zusätzlichen vertikalen Linien auf. In diesem Bereich ist die Holzstruktur durch Würfelbruch geschädigt. Diese vertikale Struktur und allgemein die Auflösung der Jahrringstruktur bezeichnet die geschädigten Bereiche. Auf beiden Röntgenaufnahmen fallen ab 65 cm leichte Strukturänderungen auf, die sich immer weiter verstärken und die Schädigung darstellen.

Ein Vergleich der Auflösung von Abbildung 201 (300 kV) und Abbildung 202 (150 kV) zeigt, dass hier, bei dem trockenen Probekörper mit einer geringen durchstrahlten Dicke (14 cm) mit der Blitzröhre mit 150 kV durch den hohen Anteil an niederenergetischer Strahlung etwas kontrastreichere Aufnahmen als mit 300 kV erzielt werden können. Da dieser Unterschied sehr gering ist und für die Durchstrahlung des folgenden, dickeren Bauteils eine höhere Energiedosis günstiger ist, wird folgend die Blitzröhre mit 300 kV verwendet.

Eine Röntgenaufnahme der Draufsicht des Sparrens REI02 (und damit in Messrichtung der Ultraschallmessung) ist in Abbildung 203 zu sehen. Auch hier sind die Nägel, diesmal von oben, und die horizontale Jahrringstruktur des Holzes zu erkennen. Diese Jahrringstruktur ist am oberen und unteren Rand des Balkens über die gesamte Länge des Sparrens ebenso wie eine deutliche Schädigung im Inneren des Sparrens anhand des Würfelbruchs und der Strukturänderung zu erkennen. Eine genaue Betrachtung des Bildes ergab, dass auch hier ab 65 cm eine Schädigung zu erkennen ist.

REI02 5A bis 5G, Sparren 19,5 cm hoch, 14 cm dick

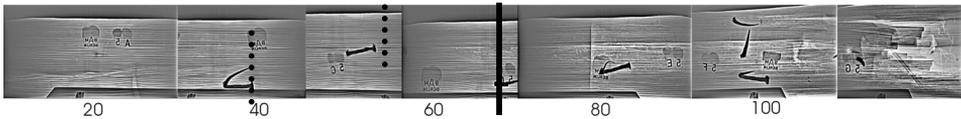


Abbildung 203: Röntgenaufnahme mit Hochpassfilterung von der Draufsicht des ausgebauten Sparrens REI02 mit Blitzröhre (300 kV) zeigt Schädigung im rechten Bereich ab 65 cm. Die Aufnahme entspricht der Messrichtung von Ultraschallecho, gepunktete Linien zeigen, bis zu welchem Bereich mit Ultraschallecho die Rückwandssignale zu detektieren waren, der Strich zeigt, ab wann im Röntgenbild eine Schädigung zu erkennen war.

Weiter werden nun Ergebnisse der Messung am ausgebauten Balken REI03 (Abbildung 204, Abbildung 205) vorgestellt, der mit 25 cm x 21 cm x 90 cm erheblich größere Abmessungen aufweist. Der Balken war so eingebaut, dass nur die beiden ungeschädigten Bereiche visuell zugänglich waren.



Abbildung 204: Ausgebauter Balken REI03 (25 cm x 21 cm x 90 cm) mit Messlinie in Bauteilmitte und am linken Bauteilrand.



Abbildung 205: Abbildung links um 180° gedreht, Rückwandbereich für Messlinie in Bauteilmitte und am linken Bauteilrand. Geschädigter Bereich deutlich anhand des Würfelbruchs zu erkennen. Kleiner weißer Würfel dient zur besseren Orientierung.

Die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchung sind als B-Bilder in Abbildung 206 und Abbildung 207 dargestellt.

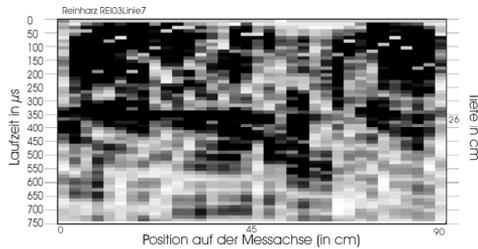


Abbildung 206: B-Bild einer Messung ($f = 55$ kHz) entlang der Mitte des ausgebauten Balkens REI03 (durchgezogene Linie) mit Rückwandecho im linken Bereich, Abschattung der Rückwand ab 60 cm.

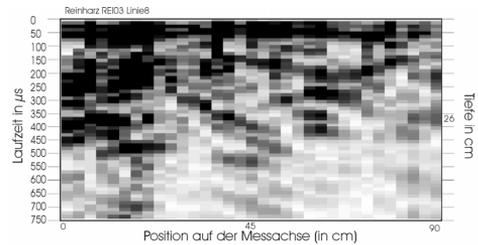


Abbildung 207: B-Bild einer Messung ($f = 55$ kHz) entlang des Randes des ausgebauten Balkens REI03 (gepunktete Linie) mit Rückwandecho im linken Bereich, Abschattung der Rückwand ab 25 cm.

In Abbildung 206 ist das Ergebnis der Messung entlang der Mitte des ausgebauten Balkens (durchgezogene Linie in Abbildung 204) mit deutlichen Rückwandechos als B-Bild zu sehen, die ab 60 cm abgeschattet werden. Eine Messung parallel dazu am Rand (gepunktete Linie) ergab das B-Bild in Abbildung 207, wo die Bauteilrückwand hier bereits ab 25 cm abgeschattet wird.

Die Röntgenaufnahme von der Seite des Balkens REI03 (Abbildung 208) zeigt in der Mitte der Aufnahme den breiten Schwindriss (Abbildung 204) und neben einigen Ästen die deutliche horizontale Jahrringstruktur. Erst ab 65 cm fallen vertikale Strukturen auf, die einer Schädigung zugeordnet werden.

Messung an REI03 Höhe 25 cm Breite 21 cm Schräge ist rechts

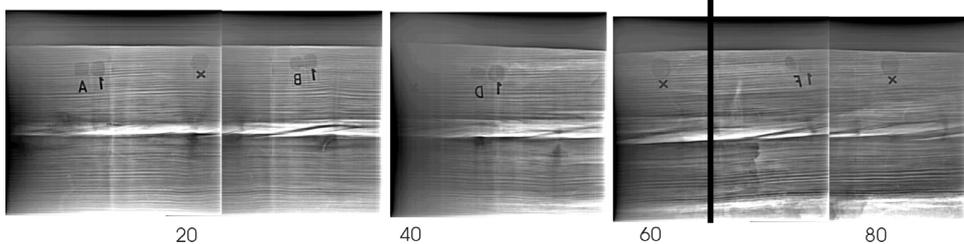


Abbildung 208: Röntgenaufnahme mit Hochpassfilterung von der Seite des Sparrens REI03 mit Blitzröhre (300 kV) zeigt Schädigung im rechten Bereich ab 65.

Eine Röntgenaufnahme von der Draufsicht (Abbildung 209) zeigt hingegen neben der deutlichen Jahrringstruktur auch Strukturänderungen, die im oberen Bereich ab etwa 35 cm und im unteren Bereich ab 65 cm zu erkennen sind. Diese ausgeprägten Schädigungen waren in der Röntgenaufnahme in Abbildung 208 kaum zu erkennen.

Messung an REI03 Höhe 25 cm Breite 21 cm Schräge ist rechts, Draufsicht Messung Serie 1

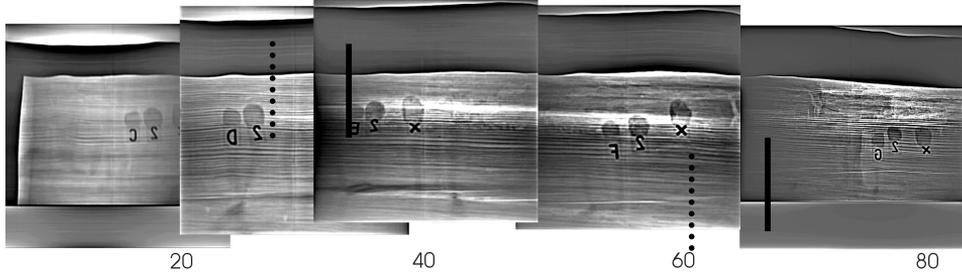


Abbildung 209: Röntgenaufnahme mit Hochpassfilterung von der Draufsicht des Sparrens REI02 mit Blitzröhre (300 kV) zeigt Schädigung (schwarze Linien) im oberen Bereich ab 35 cm und im unteren Bereich ab 65 cm. Die Aufnahme entspricht der Messrichtung von Ultraschallecho, gepunktete Linien zeigen, bis zu welchem Bereich mit Ultraschallecho die Rückwandsignale zu detektieren waren. Dabei entspricht die Messung entlang der gepunkteten Linie in Abbildung 204 der oberen Messung und die durchgezogene Linie der unteren Messung.

Fazit der Untersuchungen an den Probekörpern REI02 und REI03:

Mit dem Ultraschallechoverfahren wurde eine Abschätzung der Rückwand am Sparren REI02 in Bauteilmitte sowohl mit 33 kHz als auch mit 55 kHz festgestellt. Da mit einer höheren Frequenz weniger Oberflächenwellen entstehen und ein schärferes Echo erzielt wurde, wurde für alle weiteren Messungen die Prüffrequenz auf 55 kHz festgelegt.

Für die Röntgenmessungen wurden eine Blitzröhre mit 150 kV (weiche Strahlung) und eine Blitzröhre mit 300 kV eingesetzt. Der Vergleich der Messungen ergab, dass mit der weicheren Strahlung die Schäden etwas kontrastreicher dargestellt werden können. Da der Unterschied zwischen beiden Aufnahmen sehr gering war wird für die weiteren Untersuchungen die Blitzröhre mit 300 kV eingesetzt, da so auch problemlos größere Bauteilabmessungen und feuchte Bauteile untersucht werden können.

Die Ultraschallecho-Messungen ergaben bei den Messungen an REI02 in der Mitte des Sparrens (durchgezogener Pfeil) eine Abschätzung der Rückwand ab 54 cm, am Rand bereits ab 40 cm. Im Vergleich dazu ergab eine Auswertung der Röntgenaufnahmen von REI02, dass erst ab 65 cm eine Schädigung zu sehen ist.

Am Balken REI03 ergaben die Ultraschallmessungen entlang der Mitte (durchgezogene Linie) deutliche Rückwandsignale bis 60 cm und bei einer Messung am Rand eine Abschätzung der Rückwand ab 25 cm.

Auf der Röntgenaufnahme von der Seite des Balkens ist bis 65 cm keine Schädigung zu erkennen, da diese von der deutlichen Jahrringstruktur des ungeschädigten Holzes überdeckt wird. In der Draufsicht zeichnet sich die Schädigung, in der oberen Hälfte der Röntgenaufnahme bereits ab 30 cm, in der unteren Hälfte erst ab 70 cm ab.

Der direkte Vergleich zwischen der Ultraschallecho-Technik und der Durchstrahlung mit Röntgen zeigte eine tendenziell gleichsinnige Schadensortung. Die Ultraschallechomethode war empfindlicher und war deshalb in der Schadensfrüherkennung (z. B. Fäule) den Röntgenverfahren sogar überlegen.

Dies könnte daran liegen, dass bereits durch beginnende Fäule viele Grenzflächen zu Luft entstehen, die die Ausbreitung der Ultraschallsignale behindern, für eine Röntgenaufnahme

einen zu geringen Kontrastunterschied darstellen und so nicht erkannt werden können. Besonders ausgeprägt ist dieses Problem bei Rissen senkrecht zur Einstrahlrichtung. Aus der Werkstoffprüfung an Stahl ist diese Schwierigkeit bekannt [OSTERLOH, 2005]. Die Annahme, dass bei Röntgenmessungen bei einer guten Jahrringstruktur keine Schädigung vorliegt, kann zu Fehldeutungen führen, da Braunfäule (Würfelbruch) im Anfangsstadium nicht erkannt werden kann (Anhang A.5.1). Die unterschiedlichen Ergebnisse der Durchstrahlungen von dem Balken REI03 zeigen, wie wichtig es ist, den Balken aus verschiedenen Perspektiven zu untersuchen.

Da beide Verfahren nach gänzlich unterschiedlichen Prinzipien funktionieren, ist es mit einer Kombination des akustischen mit dem durchstrahlenden Verfahren möglich, die jeweiligen Falschanzeigen zu minimieren.

A.5.2 Kombination der Ultraschallecho-Messungen mit Röntgenmessungen und LIBS an Balken mit Schädigung von unzugänglicher Bauteilseite

An einem Balken aus einem Berliner Mietshaus wird die kombinierte Anwendung der Ultraschallechotechnik mit Transversal- und Longitudinalwellen sowie Röntgenmessungen durchgeführt. Dabei soll untersucht werden, ob sich für die praktischen Ultraschallmessungen die Longitudinal- oder Transversalwellen besser eignen und wie die Schädigung durch Fäule mit der Blitzzröhre dargestellt werden kann. Zur genaueren Analyse von Fremdsubstanzen wurde LIBS (Laser induzierte Spektralanalyse, Kapitel 4.2.4) angewendet.

Bis auf einige Verfärbungen war im unverbauten Bereich des Balkens keine Schädigung zu sehen. Durch die Freilegung aufgrund eines Umbaus wurde zufällig die Schädigung entdeckt. Dadurch war eine optische Kontrolle der eigentlich unzugänglichen geschädigten Bauteilseite für die Untersuchungen möglich. In Abbildung 210 und Abbildung 211 ist eine Schrägansicht des Balkens (15,5 cm x 12,5 cm x 75 cm) zu sehen.



Abbildung 210:
Schrägansicht
Probekörper
BER1 von oben
(15,5 cm x 12,5
cm x 75 cm)



Abbildung 211:
Schrägansicht
Probekörper
BER1 von unten

Ultraschallmessung

Zu Beginn wurden am ungehobelten Balken Messungen mit dem Punktkontaktprüfkopf A1220 durchgeführt, der zur Ankopplung keine Koppelmittel benötigt und durch die gefederte Lagerung der Prüfköpfe auch Messungen an unebenen Oberflächen zulässt. Es wurden die in den Vorversuchen optimierten (siehe Kapitel 6) Messparameter verwendet, wie z. B. eine Anregungsfrequenz von 55 kHz ($\lambda = 2,5$ cm) und eine Ankopplung der Prüfköpfe mit einer Polarisation parallel zur Faser. Die bei der Ultraschallechotechnik üblichen Oberflächenwellen sind bei allen B- Bildern zu sehen und beeinflussen die Messungen nicht.

In dem B-Bild (Abbildung 212) ist das Ergebnis einer Messung von der oberen Oberfläche (Abbildung 211) zu sehen, das deutliche Echos von der Minderdicke des Versatzes und von der Bauteilrückwand aufweist. Ein zusätzliches Echo (Pfeil) kann einem Ast zugeordnet werden (Abbildung 210). Nach 40 cm ab Bauteilbeginn kommt es zu einer Abschattung der Rückwand.

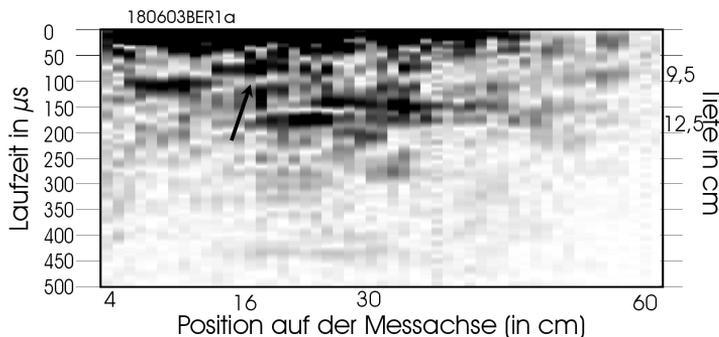


Abbildung 212: B-Bild der Messung von der oberen Oberfläche (Abbildung 211) von Probekörper BER1 mit deutlichem Echo an Minderdicke, Bauteilrückwand und direktem Echo an Ast (Pfeil und Abbildung 210), Abschattung der Rückwand ab 40 cm.

Eine Messung mit Ankopplung an der Seitenfläche (Abbildung 211) ergab das in Abbildung 213 dargestellte B-Bild. Auch hier sind klare Echos von der Bauteilrückwand bis 40 cm ab Bauteilbeginn zu sehen. Weiterhin fällt auch hier das Echo des Astes (Pfeil) auf.

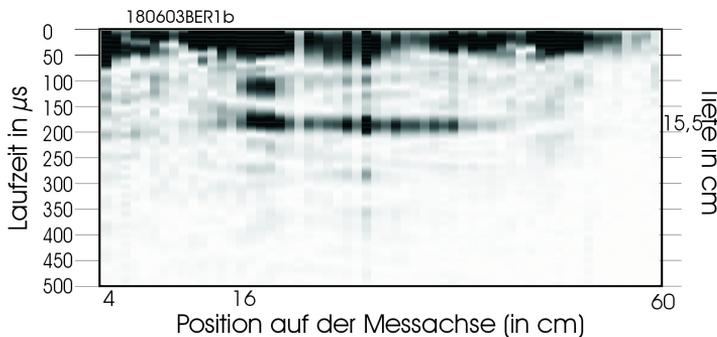


Abbildung 213: B-Bild der Messung von der Seitenfläche aus von Probekörper BER1 mit deutlichem Echo an Bauteilrückwand und direktem Echo an Ast (Pfeil und Abbildung 210), kein Echo zu Messbeginn durch zu geringe Ankopplfläche, Abschattung der Rückwand ab 40 cm.

Für weitere Messungen mit zylindrischen **Longitudinalwellenprüfköpfen**, welche mit einer Mittenfrequenz von 100 kHz und RC2-Puls angeregt wurden, war es notwendig, den Probekörper zu hobeln, um eine glatte Oberfläche zu bekommen. Das Ergebnis der Messung mit Longitudinalwellen ist als B-Bild in Abbildung 214 zu sehen.

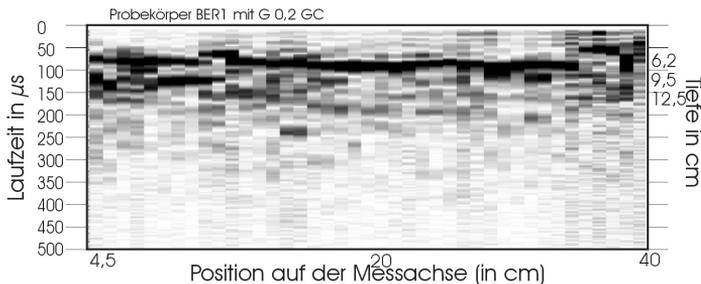


Abbildung 214: B-Bild der Messung von der Oberfläche (Abbildung 210) an Probekörper BER1 mit Longitudinalwellen mit deutlichem Echo an Schwindriss, Aussparung und geringen Echos an Bauteilrückwand ($v = 1,63 \text{ km/s}$)

Hier fällt zuerst ein durchgehendes Echo mit einer Laufzeit von etwa $80 \mu\text{s}$ auf, was einem Schwindriss in der Tiefe von $6,2 \text{ cm}$ zugeordnet werden kann. Bei genauer Betrachtung sind links Echos von der Ausklinkung ($d = 9,5 \text{ cm}$) mit $115 \mu\text{s}$ und Echos der Bauteilrückseite ($d = 12,5 \text{ cm}$) mit einer Laufzeit von $155 \mu\text{s}$ zu erkennen. Das Rückwandecho ist durch den Schwindriss in großen Teilen der Messung abgeschattet und so kann keine Aussage über den Zustand des Bauteils hinter dem Schwindriss getroffen werden. Auch das Echo am Schwindriss wird ab 36 cm durch die Schädigung abgeschattet.

Röntgenmessung

Nach den Ultraschalluntersuchungen wurden Röntgenuntersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, den Bereich mit abgeschatteten Rückwandecho genauer zu untersuchen. Die Röntgenmessung wurden mit der Röntgenblitzröhre XR200 (150 kV) und Flachdetektor durchgeführt. Details zu den Untersuchungen von Holz mit Röntgenverfahren können Kapitel A.2.4 entnommen werden.



Abbildung 215: Messaufbau mit Flachdetektor und Blitzröhre bei der Untersuchung von Probekörper BER1, dargestellte Röntgenaufnahmen zeigen Bereich rechts neben der gepunkteten Linie

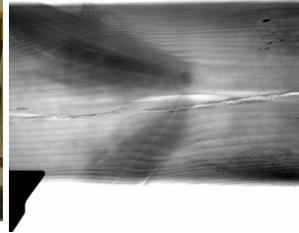


Abbildung 216: Röntgenaufnahme in Negativdarstellung von Probekörper BER1 mit Ästen und Riss von visuell offensichtlich geschädigtem Bereich (Abbildung 215)

Das Ergebnis der Röntgendurchstrahlung ab der gepunkteten Linie in Abbildung 215 ist in Abbildung 216 als Negativdarstellung und in Abbildung 217 als hochpassgefiltertes Bild zu sehen. Der verfärbte, d. h. schon geschädigte Bereich wird in den Röntgenbildern nicht dargestellt, die beiden Äste und die Risse sind hingegen gut zu erkennen. Erst die ausgeprägte Schädigung des Balkens wird in Abbildung 218 und Abbildung 219 deutlich abgebildet, da bei geringen Schädigungen die Kontraste zu gering sind und so nicht abgebildet werden.

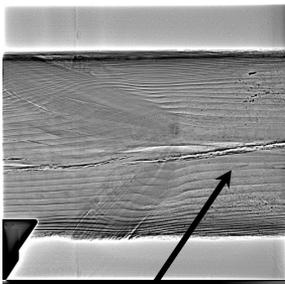


Abbildung 217: Röntgenaufnahme als Draufsicht nach Hochpassfilterung von Probekörper BER1 mit Ästen und Rissen, wobei der rechte Riss (Pfeil) eine höhere Absorption aufweist.

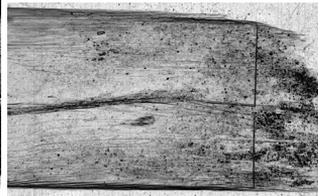


Abbildung 218: Röntgenaufnahme als Draufsicht nach Hochpassfilterung von Probekörper BER1 mit Ästen und Riss

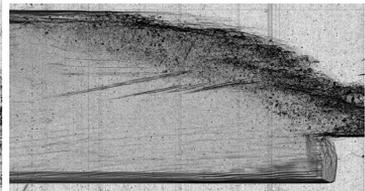


Abbildung 219: Röntgenaufnahme als Seitenansicht nach Hochpassfilterung von geschädigtem Ende von Probekörper BER1

Bei genauer Betrachtung von Abbildung 217 fällt auf, dass in einem der beiden breiten Risse eine anderen Struktur vorhanden ist. Mit Dual-Energy (Anhang A.3.2.3) wurde dieser Bereich weiter untersucht (Abbildung 220, Abbildung 221). In beiden Bildern sind Bereiche mit unterschiedlichen Absorptionseigenschaften farbcodiert dargestellt (Kapitel A.3.2.3). Damit unterscheiden sich z. B. die Äste trotz höherer Absorption vom übrigen Holz nicht mehr, die Fremdsubstanz im unteren Riss ist dafür um so stärker zu erkennen.

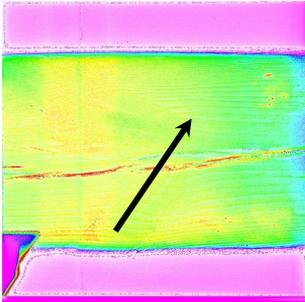


Abbildung 220: Röntgenaufnahme von Probekörper BER1 mit Dual-Energy mit sehr schwach sichtbaren Ästen und Rissen. Der untere Riss (Pfeil) ist mit einer Fremdschicht gefüllt.

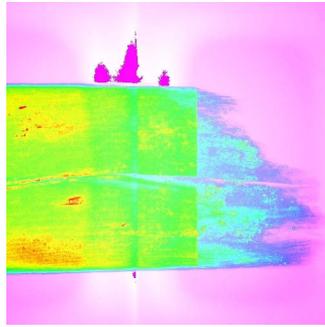


Abbildung 221: Röntgenaufnahme von geschädigtem Ende des Probekörpers BER1 mit Dual-Energy

Laser-Induzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS)

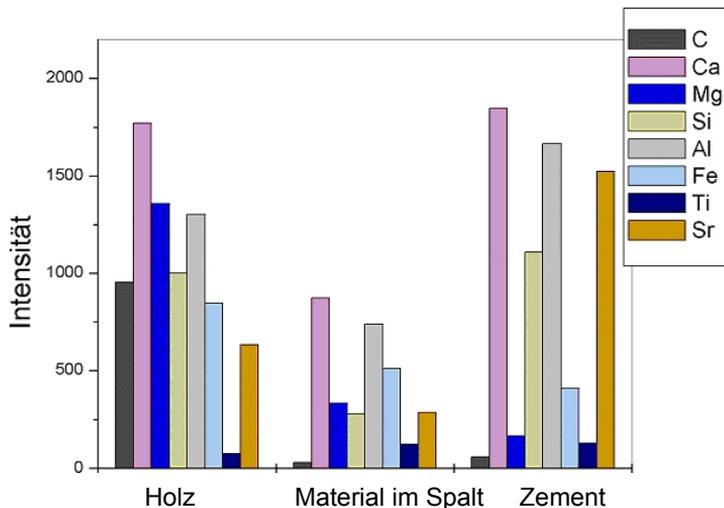
Um zusätzliche Information über die weiße Verunreinigung im Riss durch Fremdstoffe zu bekommen, wurden genauere Untersuchungen mit Laser-Induzierter Breakdown Spektroskopie (LIBS) in Auftrag gegeben. Diese Messungen (Abbildung 222) wurden in der Fachgruppe IV.4 von Herrn D. Schaurich und Herrn G. Wilsch durchgeführt.



Abbildung 222: Messung mit LIBS an Probekörper BER1 mit Verunreinigung in einem Riss

In Tabelle 7 ist die Messung des zu untersuchenden Materials im Spalt im Vergleich zu Holz und Zement dargestellt. Bei den Messungen konnte eindeutig ausgeschlossen werden, dass es sich bei der Verunreinigung um Holz, Zement oder eine Farbe mit Titanweiß handelt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Untersuchungen mit LIBS am Holz, im Spalt und als Vergleich mit Zement.



Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Messungen mit der Ultraschallechotechnik ergaben, dass mit Transversalwellen die Bauteilrückwand und mit Longitudinalwellen der Schwindriss klar dargestellt werden konnte. Im geschädigten Bereich kam es bei beiden Wellenarten zu einer Abschattung der Rückwand.

Mit der Röntgenstrahlung konnten die Schwindriss senkrecht zur Durchstrahlungsrichtung und beginnende Fäule nicht dargestellt werden, da es sich hierbei um zu geringe Absorptionsunterschiede handelt. Stark geschädigte Bereiche können hingegen gut untersucht werden und ein Restquerschnitt bestimmt werden. Weitere Untersuchungen an einem, mit Dual-Energy als Fremdschubstanz markierten Bereich, ergaben mit LIBS, dass es sich hierbei tatsächlich um eine Fremdschubstanz handelt.

A.5.3 Kombiniertes Einsatz von Röntgenmessung, Schalltomographie und elektrischer Tomographie an Baum mit Kernfäule

In den vorherigen Beispielen wurde Ultraschallecho und Durchstrahlung an mehreren trockenen Bauteilen erfolgreich angewendet. An einem Birnbaumstamm mit Kernfäule (Abbildung 223) zeigte sich, dass Ultraschallecho auch mit den beweglichen Punktkontaktköpfen des Gerätes A1220, wegen der unebenen Rinde schlecht möglich ist und es wurden Alternativen zur Untersuchung des Baumes gesucht. So wurden an dem Baumstamm aus dem Garten des Umwelt Bundesamtes Untersuchungen mit Radiographie (Kapitel A.2.4), geoelektrischer Tomographie (SIP) (Kapitel 4.1.3) und Schalltomographie (Kapitel 4.2.6.3) durchgeführt. Es sollte verglichen werden, wie gut welches Verfahren die Lage und Ausdehnung der Kernfäule orten kann.

Röntgenmessungen

Als erstes werden nun die Untersuchungen mittels Röntgenstrahlen vorgestellt. Zu beachten war hier, dass durch die hohe Feuchte des frisch gefällten Baumes die Absorption hoch ist (siehe Kapitel A.3.3.2). Zudem war nicht bekannt, welcher Bereich wie feucht ist und so wird hier neben der Absorption auch die Struktur mit der Hochpassfilterung dargestellt und untersucht.



Abbildung 223: Messung am Baumstamm einer Birne mit Kernfäule bei 0°

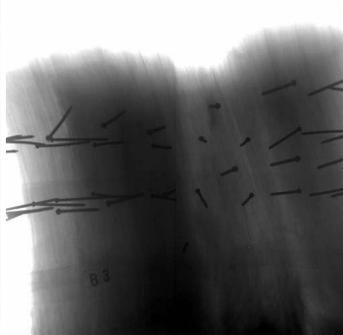


Abbildung 224: Röntgenaufnahme von Stamm einer Birne mit Kernfäule bei 135° mit 60 kV, 9 mA (Seifert Isovolt 320/120) in Negativdarstellung

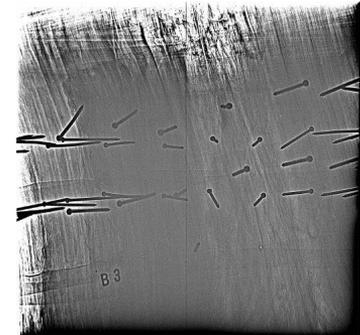


Abbildung 225: Röntgenaufnahme vom Stamm einer Birne mit Kernfäule bei 135° mit 60 kV, 9 mA (Seifert Isovolt 320/120) mit Hochpassfilterung

Für die Röntgenmessungen wurde im Labor die Röntgenröhre Seifert Isovolt 320/120 (Abbildung 124) eingesetzt. Um unterschiedliche Ansichten zu bekommen wurde der Probekörper jeweils um 45° gedreht und so vier Aufnahmen mit unterschiedlichem Durchstrahlungswinkel erzeugt. Beispielhaft sind folgend die Ergebnisse einer Position als Negativbild (Abbildung 224) dargestellt. Die eingeschlagenen Nägel dienen als Ankopplung für die SIP-Messungen und spielen folglich keine Rolle.

In der Mitte des durchstrahlten Probekörpers (Abbildung 224) ist ein heller Bereich mit geringerer Absorption als am Rand zu sehen, der als Diagonale von links oben nach rechts unten verläuft. Ein Blick auf die Röntgenaufnahme mit Hochpassfilterung (Abbildung 225) und nach einer zusätzlichen Rauschfilterung (Abbildung 226) zeigen, dass sich in diesem Bereich keine deutlichen Jahrringstrukturen wie im Randbereich sondern eine andere, aufgelöste Struktur zeigt. Eine rechnerische Kombination der Röntgenbilder mit einer Aufnahme mit aufgehärteter Strahlung, Dual-Energy (Kapitel A.3.2.3) und einer nachfolgenden Farbcodierung zeigt auch einen Farbunterschied zwischen dem geschädigten und ungeschädigten Bereich und macht so den Schaden noch deutlicher sichtbar (Abbildung 227).

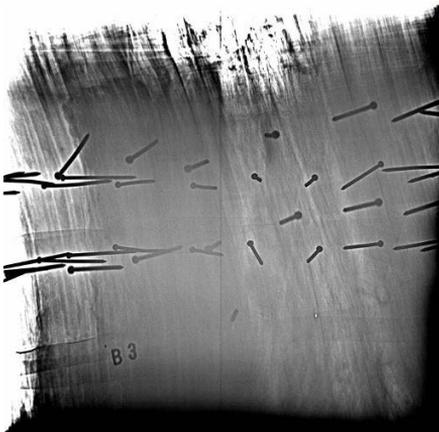


Abbildung 226: Röntgenaufnahme von Birne mit Kernfäule bei 135 ° mit 60 kV, 9 mA (Seifert Isovolt 320) mit Hochpassfilterung und Rauschfilterung



Abbildung 227: Dual-Energy aus 60 kV, 9 mA und aufgehärteter Strahlung mit 150 kV, 7 mA, 2 mm Cu (Seifert Isovolt 320)

Schalltomograph (Fa. PICUS)

In Abbildung 228 ist das Gerät PICUS während der Messung im unteren Teil des Baumstamms zu sehen. Wie in Kapitel 4.2.6.3 beschrieben, wurden die unterschiedlichen Schalllaufzeiten zwischen dem Sendesignal (Hammerschlag) und den Empfängern gemessen und geometriekorrigiert ausgewertet. Dabei äußerten sich vorhandene Anomalien in einem relativen Geschwindigkeitsabfall. Das Verfahren liefert aber keine Geschwindigkeitsverteilung wie bei einer üblichen tomographischen Berechnung, sondern lediglich Falschfarbenbilder, deren Details nicht offengelegt werden. Das Ergebnis in Abbildung 229 zeigt deutliche Farbunterschiede im Stamm, wobei in den Randbereichen eine braune Farbe für hohe Schallgeschwindigkeit und im Kern eine blaue Farbe für sehr geringe Schallgeschwindigkeiten steht.



Abbildung 228: Messgerät PICUS am Probekörper mit Sensoren und Rechner

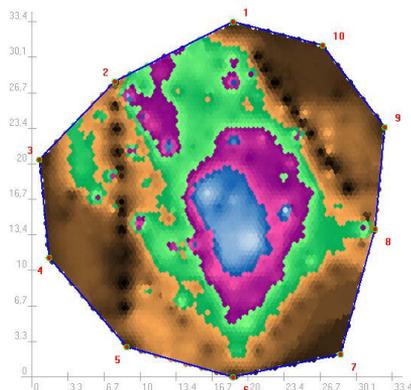


Abbildung 229: Ergebnis einer schalltomographischen Messung an Birne mit Kernfäule (Draufsicht, Messbeginn bei Punkt 1)

Deutlich zu sehen ist etwas rechts von der Mitte ein ausgeprägter Bereich geringer Schallgeschwindigkeit, welcher der Schädigung zugeordnet werden kann.

Durch den großen Abstand der Elektroden und Risse kommt es auch zu schlechter interpretierbaren Bereichen, wie z. B. den grünen Bereich (Mitte links), der durch die Lage zwischen zwei Messpositionen und durch einen Riss geringere Schallgeschwindigkeiten des Holzes erscheinen lässt. Dennoch kann klar die Schädigung im Inneren des Baumes detektiert werden.

Spektral induzierte Polarisation (SIP)

Mit dem in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Verfahren SIP wurden Messungen an dem Probekörper in drei unterschiedlichen Höhen durch die Geophysikerin T. MARTIN durchgeführt. In Abbildung 230 ist der Versuchsaufbau, in Abbildung 231 die Anordnung der Elektroden zu sehen.



Abbildung 230: Aufbau der SIP-Messung am Baumstamm mit Kernfäule

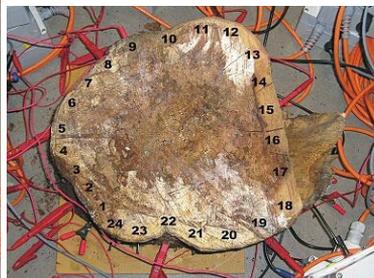


Abbildung 231: Anordnung der Elektroden für SIP-Messung am Baumstamm (Abbildung von Frau T. MARTIN)

Als Elektroden wurden 24 Stahlnägel mit ca. 4,4 cm Abstand ca. 1-2 cm tief eingeschlagen. Daran wurden 23 Messkanäle (Remote Units (RU)) befestigt, die untereinander mit Glasfaserkabeln verbunden wurden. Mit der Apparatur SIP 256c wurden der Strom eingespeist und die Spannungsdifferenzen erfasst. Gesteuert und betrieben wurde dies über einen externen Laptop und eine 12V Autobatterie.

Im Zuge der Messungen wurde sowohl der elektrische Widerstand als auch die frequenzabhängige Phase bestimmt (Abbildung 232). Zum besseren Verständnis der Lage der drei Messebenen ist in Abbildung 233 eine Röntgenaufnahme mit der Lage der Messebenen zu sehen. Ein erster Blick zeigt, dass sich die einzelnen farbigen Bereiche je Messebene von den jeweils anderen Messebenen unterscheiden.

Während sich der Widerstand (Abbildung 232 links) in der untersten Ebene 1 als ein großer, sehr niederohmiger Bereich mittig mit Ausdehnung nach unten darstellt, wird er in den darüber liegenden Tomogrammen großflächiger und wandert an den linken Rand. Dieser Bereich hoher Leitfähigkeit (Widerstände um $150 \Omega\text{m}$) deutet auf eine feuchte Stelle hin. Die hohen Widerstände hingegen wandern von links unten nach rechts oben.

In der Phasendarstellung (Abbildung 232 Mitte) ist auch eine anomale Zone geringer Polarisierbarkeit zu erkennen. Auch diese wandert von einem Bereich etwas rechts von der Mitte in Ebene 1 in einen Bereich links von der Mitte in Ebene 3.

Bei den Widerstandsabbildungen und der Darstellung der Phasen muss immer beachtet werden, dass die Randzonen nicht sehr aussagekräftig sind, da die dort dargestellten Bereiche keine Messinformationen enthalten, sondern nur eine Interpretation des Inversionsprogrammes darstellen. Des weiteren spielt die Anisotropie hier auch eine sehr große Rolle.

Nach diesen ersten Untersuchungen mit SIP an Bäumen besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Zur genauen Auswertung ist auch die genaue Lage der feuchten, gesunden und zersetzten Bereiche notwendig. Da diese nicht bekannt sind, wurde hierfür eine CT-Messung zur genaueren Analyse in Auftrag gegeben.

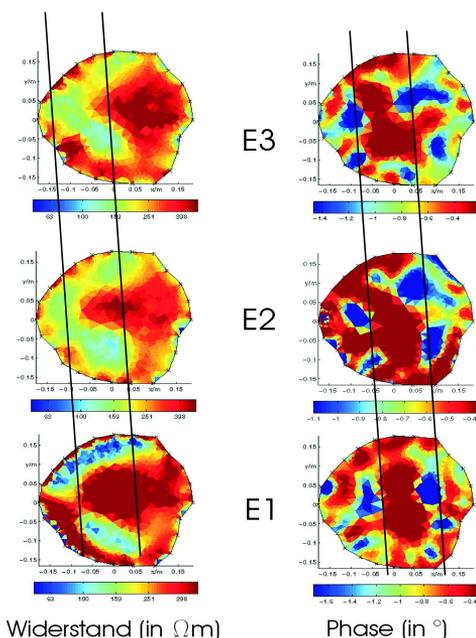


Abbildung 232: Inversionsergebnisse der SIP-Messung in den unterschiedlichen Ebenen, links als Tomogramm des Widerstandes, rechts als Tomogramm der Phase dargestellt

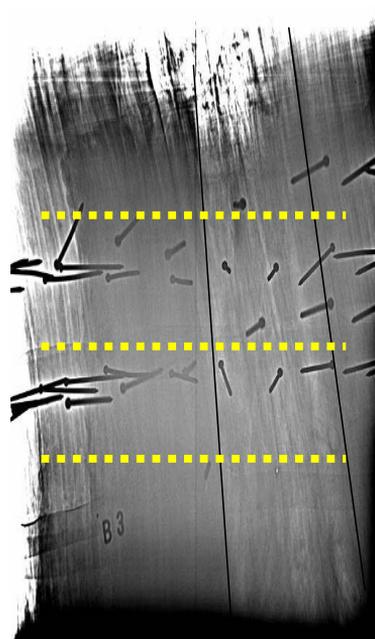


Abbildung 233: Röntgenaufnahme mit Position der SIP-Messungen als gestrichelte Linie

Zusammenfassung

Nachdem trotz der beweglichen Ultraschallprüfköpfe keine Messungen an der unebenen Rinde mit Ultraschallecho möglich waren, wurden als Ersatz die Schalltomographie und geoelektrische Tomographie zusammen mit Durchstrahlung angewandt. Zum Vergleich der Messergebnisse der drei Verfahren eignet sich die unterste Ebene am besten. Hier ist im Röntgenbild (Abbildung 226) eine Schädigung zu sehen, die rechts von der Mitte am deutlichsten hervortritt.

Im Schalltomogramm erscheinen in diesem Bereich geringere Schallgeschwindigkeiten, die auf eine Schädigung hindeuten. Auch die Auswertung des Widerstandes und der Phase (Abbildung 232) zeigt hier eine Schädigung, die eine Tendenz des Schadens von rechts unten nach links oben hat.

Ein genauer Vergleich der Schalltomogramms (Abbildung 229) mit den Phasentomogramm (Abbildung 232 rechts) und dem Röntgenbild (Abbildung 226) zeigt eine sehr große Übereinstimmung.

So war es möglich mit Röntgen und als Ersatz für Ultraschallecho mit Schalltomographie und SIP in einem Probekörper mit Kernfäule den Verlauf der Schädigung zu orten. Eine Bewertung, wie genau welches Verfahren die Schädigung geortet hat ist erst mit einer CT-Messungen des gesamten Baumstammes möglich.