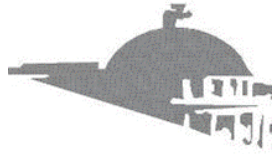




Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Baustoffe
Institute for Building Materials

Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Baustoffe
Holzphysik
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Int. Bericht ETHZ/IfB-HP Nr. 54

Alterung von Klebfugen in Holzbauteilen und Möglichkeiten zu deren Früherkennung

Fonds zur Förderung der Wald und Holzforschung

Bearbeiter:	Thomas Schnider Christian Müller
Leiter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Niemz
Bearbeitungszeitdauer:	März 2008 – Februar 2009

Zürich, 12.05.10

Abstract

An Klebverbindungen, als eine der wichtigsten Verbindungsformen im modernen Holzbau, werden hohe Anforderungen gestellt. Dies gilt insbesondere beim Einsatz von Brettschichtholz. Um auch unter dauerhafter Last und wechselnder klimatischer Beanspruchung die Standsicherheit zu gewährleisten, ist ein zuverlässiges Prüfverfahren zur effizienten, zerstörungsfreien Erkennung von Delaminierungen unabdingbar.

Die Untersuchungen dieses Berichtes können in drei Versuche unterteilt werden. In Vor- und Hauptversuch und in die ergänzenden Versuche. Im Vorversuch wurden Durchschallungen mit verschiedenen Ultraschallgeräten an faserparallel, teilverklebten, zweilagigen Fichtenproben durchgeführt. Ziel des Vorversuchs war es, die Eignung von Ultraschall zur Ortung von Delaminierungen in Klebfugen zu evaluieren und die Streuung zu ermitteln. Die Ergebnisse des Vorversuchs dienen als Grundlagen für die Auswertung der Untersuchungen im Hauptversuch. Im Hauptversuch wurden ebenfalls zweilagige Proben aus Buche und Fichte mit unterschiedlichen Klebstofftypen (MUF, PRF, 1K-PUR) faserparallel verklebt. Diese Proben wurden verschiedenen natürlichen oder künstlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Die auftretenden Klimaschwankungen rufen Spannungen in der Klebfuge hervor, die wiederum zu Delaminierungserscheinungen führen können. Mit Hilfe von Ultraschall- und Eigenfrequenzmessungen wurde versucht, eine entstandene Delaminierungsstelle in der Klebfuge zu erkennen. In den ergänzenden Versuchen wurde die Detektierung von Fehlverklebungen an Brettschichtholz in realen Dimensionen untersucht. Dabei wurde exemplarisch mit verschiedensten zerstörungsfreien Messmethoden versucht, die Grenzen und Schwierigkeiten der einzelnen Messgeräte auf zu zeigen.

Die prinzipielle Eignung von Ultraschall-Laufzeitmessungen zur Detektion von Delaminierungen konnte bestätigt werden. Die Fehlverklebungen in den Vorversuchen konnten weitgehend problemlos und mit guter Übereinstimmung zu den realen Klebfugenverläufen identifiziert werden. Ebenso wurde belegt, dass bei mehreren übereinanderliegenden Delaminierungen im selben Prüfkörperabschnitt mit jeder Fehlverklebung die Schalllaufzeit deutlich und jeweils um etwa denselben Betrag zunimmt. Im Hauptversuch konnte mit den verwendeten Schnellalterungstests keine Delaminierungen in den Klebfugen erzeugt werden. Dies zeigen die Messungen der Restfestigkeit der Klebstoffe. Ebenso zeigt auch die zerstörungsfreie Erkennung von Delaminierungen keine eindeutigen Resultate, da keine Delaminierungen vorhanden waren. Beim Brettschichtholz mit realitätsnahe Querschnitt war der Einfluss der Holzigenschaften auf die Schalllaufzeit nachweisbar. Ein Erkennen der Fehlverklebungen ist möglich, eine sichere Interpretation der Messergebnisse wird jedoch teilweise durch Einflussfaktoren wie Jahrringlage und -breite erschwert.

Vorwort

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Methoden der künstlichen Alterung von Vollholzverklebungen getestet werden und der Mechanismus des Versagens im Bereich der Klebfuge untersucht werden. Mittels Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (Durchschallung, Eigenfrequenzmessung) soll die Früherkennung einer Schädigung im Bereich der Klebfugen analysiert werden. Die Bearbeitung erfolgt in Kooperation der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau in Biel und mit der ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Holzphysik.

Einen Dank ist hier noch den Personen auszusprechen, die mit ihren Zuarbeiten, Praktikums- oder Bachelorarbeiten zum Gelingen dieses Berichtes beigetragen haben. Einen besonderen Dank geht an Christian Müller, der mit seiner Praktikumsarbeit einen Grossteil dieses Berichtes erarbeitet hat. Weiter geht ein Dank an Dr. Urs von Arx von der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Forschung und Entwicklung, Werkstoffe und Holztechnologie und an Herrn Göcke von der Firma Argus Electronic in Rostock, welche mit ihren Untersuchungen die Ergebnisse im Bericht bereichert haben. Zudem geht ein Dank an die Studenten des Lehrstuhls für Bauingenieurwesen, die mit Teilen ihrer Bachelorarbeiten die Forschungsergebnisse in diesem Bericht ergänzt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	ABKÜRZUNGEN	5
2	EINLEITUNG.....	7
2.1	ZIELSTELLUNG.....	8
3	STAND DER ERKENNTNISSE	9
3.1	HOLZ	9
3.1.1	Allgemein zu Nadel- und Laubholz	10
3.2	ALTERUNG UND DELAMINIERUNG VON KLEBSTOFFEN.....	11
3.3	KLEBSTOFFE	14
3.3.1	Bindungskräfte in Klebungen.....	15
3.3.2	Einflussfaktoren auf die Eigenschaften von Holzverklebungen	18
3.3.3	Klebstoffeinteilung	19
4	MATERIAL UND METHODIK	24
4.1	HOLZ	25
4.1.1	Buche (<i>Fagus sylvatica</i> L.).....	25
4.1.2	Fichte (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.).....	25
4.2	KLEBSTOFFE	26
4.3	HOLZFEUCHTE	26
4.4	DICHTE.....	27
4.5	VORVERSUCH: ERMITTLUNG DER ZUVERLÄSSLICHKEIT VON ULTRASCHALL ZUR DETEKTIERUNG VON FEHLSTELLEN IN KLEBFUGEN	27
4.5.1	Material.....	27
4.5.2	Methodik	29
4.6	HAUPTVERSUCH: UNTERSUCHUNG DER ALTERUNG AN KLEBFUGEN	31
4.6.1	Material.....	31
4.6.2	Methode.....	31
4.7	ERGÄNZENDE VERSUCHE: ERKENNUNG VON KÜNSTLICH ERZEUGTEN DELAMINIERUNGEN AN BRETTSCHICHTHOLZ	44
4.7.1	Material.....	45
4.7.2	Methodik	46

5	ERGEBNISSE	52
5.1	VORVERSUCH: ERMITTLUNG DER VERLÄSSLICHKEIT VON ULTRASCHALL ZUR DETEKTIERUNG VON FEHLSTELLEN IN KLEBFUGEN	52
5.1.1	<i>Zuverlässigkeit von Ultraschallmessungen mit PCUS 10NF an Fichtenbretter</i>	52
5.2	HAUPTVERSUCH: UNTERSUCHUNG DER ALTERUNG AN KLEBFUGEN	54
5.2.1	<i>Holzfeuchte</i>	54
5.2.2	<i>Dichte</i>	55
5.2.3	<i>Zerstörungsfreie Erkennung von Delaminierungen.....</i>	56
5.2.4	<i>Ermittlung der Restfestigkeit</i>	61
5.2.5	<i>Einfluss der verwendeten Schnellalterungstests</i>	69
5.2.6	<i>Korrelationen zwischen der Restfestigkeit und der zerstörungsfreien Erkennung von Delaminierungen.....</i>	72
5.3	ERGÄNZENDE VERSUCHE: ERKENNUNG VON KÜNSTLICH ERZEUGTEN DELAMINIERUNGEN AN BRETTSCHICHTHOLZ	78
5.3.1	<i>Messungen mit Durchschallungsmethoden.....</i>	78
5.3.2	<i>Elektrische Impedanzmessungen</i>	84
6	DISKUSSION	86
6.1	VORVERSUCH: ERMITTLUNG DER VERLÄSSLICHKEIT VON ULTRASCHALL ZUR DETEKTIERUNG VON FEHLSTELLEN IN KLEBFUGEN	86
6.2	HAUPTVERSUCH: UNTERSUCHUNG DER ALTERUNG AN KLEBFUGEN	88
6.3	ERGÄNZENDE VERSUCHE: ERKENNUNG VON KÜNSTLICH ERZEUGTEN DELAMINIERUNGEN AN BRETTSCHICHTHOLZ	90
6.4	MESSUNG DER CHEMISCHEN UND STRUKTURELLEN ÄNDERUNGEN IN GEALTERTEN KLEBFUGEN (BFH AHB BIEL)	94
6.4.1	<i>IR Spektroskopie</i>	94
6.4.2	<i>MALDI TOF Massen-Spektroskopie.....</i>	95
6.4.3	<i>Chemilumineszenz.....</i>	95
7	SCHLUSSFOLGERUNG EMPFEHLUNG FÜR WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN	97
8	VERZEICHNISSE	102
8.1	ABBILDUNGEN	102
8.2	TABELLEN	109
8.3	FORMELN	111
8.4	LITERATUR.....	111

1 Abkürzungen

Abkürzung:	Bezeichnung:	Einheit:
$\overline{X}$	Mittelwert	
1K-PUR	Ein-Komponenten-Polyurethane	
a	Steigung bei einer linearen Funktion	
A	Fläche	mm ²
BSH	Brettschichtholz	
BU	Buche (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	
F	Kraft	N
FI	Fichte (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.)	
FV	Fehlverklebung	
HWS	Holzwerkstoffe	
Hz	Hertz	Hz
K	Künstliche Bewitterung (Schnellalterungstest)	
L	Länge in t _n	mm
L ₀	Anfangslänge in t ₀	mm
m	Masse	g
m ₀	Holzmasse darrtrocken	g
MF	Melamin-Formaldehyd-Harz	
m _u	Holzmasse bei Holzfeuchte ω	g
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd	
N	Natürliche Bewitterung (Schnellalterungstest)	
n	Probenumfang	
PF	Phenol-Formaldehyd-Harz	
PK	Prüfkörper	
PRF	Phenol-Resorcin-Formaldehyd	
PUR	Polyurethan	

R^2	Bestimmtheitsmass bei linearen Trendlinien	
RF	Resorcin-Formaldehyd-Harz	
rLf	Relative Luftfeuchte	%
s_x	Standardabweichung	
V	Volumen	m^3
v	Variationskoeffizient	%
VH	Vollholz	
W	Wechselklimalagerung (Schnellalterungstest)	
ε	Dehnung	%
μs	Mikrosekunden	μs
ρ	Dichte	g/cm^3
τ	Zugscherfestigkeit	N/mm^2
ω	Holzfeuchte	%

2 Einleitung

Die Untersuchungen in diesem Bericht können in drei Teile eingeordnet werden. Im ersten Teil, den Vorversuchen, wurde die Möglichkeit getestet, mittels der zerstörungsfreien Messmethodik der Durchschallung, Fehlverklebungen in Holzverklebungen zu orten. Dabei sollen die Fehlverklebungen delaminierte Stellen in einer Klebefuge simulieren. Aus diesem Vorversuch erhoffte man sich die aufspürbare Grösse einer delaminierten Stelle in einer Klebefuge zu ermitteln. Im zweiten Teil, den Hauptversuchen, wurden zwei Methoden zur künstlichen Alterung von Klebstoff untersucht und mit Klebstoffen nach einer natürlichen Bewitterung verglichen. Zudem wurden hier die Klebfuge mit zwei zerstörungsfreien Methoden (Durchschallen, Eigenfrequenz) auf möglich aufgetretenen Delaminierungen untersucht. Im dritten Teil, den ergänzenden Versuchen, wurde die Ortung von Fehlverklebungen an Brett-schichtholz (BSH) in realen Dimensionen untersucht. Dabei wurde exemplarisch mit verschiedensten zerstörungsfreien Messmethoden versucht, die Grenzen und Schwierigkeiten der einzelnen Messgeräte auf zu zeigen.

Eine Übersicht zu aktuellen Prüfverfahren ist im Report der COST-Aktion E13 (2003) zusammengestellt. Folgende Prüfverfahren sind derzeit üblich:

Prüfung mechanischer Eigenschaften, Pilzresistenz, Feuchtebeständigkeit, Temperaturbeständigkeit, Beständigkeit gegenüber UV Licht und die Kombination der Verfahren. Gewisse Langzeittests wurden an der FMPA Stuttgart durchgeführt, dabei erfolgte eine Wechselklimalagerung in einem Glashaus und eine mechanische Belastung. Praktisch erfolgt meist eine Prüfung von Vollholzverbindungen nach EN 204 oder EN 302. Dabei werden meist verschiedene Schnelltests durchgeführt (z.B. Wasserlagerung), um den Alterungsprozess zu beschleunigen. In der Praxis kann es aber zu vielfältigen Überlagerungen von Beanspruchungen kommen, die nur schwer im Kurzzeitversuch nachvollziehbar sind.

2.1 Zielstellung

- Verklebung von Holzbauteilen mit verschiedenen für die Brettschichtholzverklebung zugelassenen Klebstoffsysteme
- Vergleichende Testung verschiedener Methoden der Schnellalterung (dazu Zusammenarbeit mit PURBOND), Messung der Scherfestigkeit nach EN 302
- Vergleichende Testung von Methoden der zerstörungsfreien Prüfung (z.B. Ultraschall und Eigenfrequenz) Messungen an gezielt erzeugten künstlichen Defekten bei Fehlverklebung.
- Vergleichende Messungen der Fugenverzerrungen / Verschiebungen unter Last mittels Vic 2D (Video image correlation), um die Auswirkungen der Alterung zu quantifizieren.
- Messung von chemischen und strukturellen Änderungen in gealterten Klebfugen (Arbeiten an der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau (BFH-AHB) in Biel)

3 Stand der Erkenntnisse

Holzverklebungen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Die Klebfugen werden neben statischen Belastungen durch die Konstruktion auch durch erhöhte Feuchtigkeit und Klimaschwankungen stark beeinflusst. Äussere Belastung und klimabedingte Eigenspannungen können verbunden mit dem mechanosorptiven Effekt zur Rissbildung und auch Delaminierung der Klebfuge führen.

3.1 Holz [25]

Holz ist im Vergleich zu anderen Baustoffen ein anisotropes und inhomogenes Material. Praktisch alle Holzeigenschaften unterscheiden sich in den drei anatomischen Hauptrichtungen (längs, radial, tangential) deutlich voneinander. Grund dafür ist eine in jede Richtung andere Zellorientierung, welche zur Anisotropie des Holzes führt. Inhomogenität entsteht dadurch, dass verschiedene Wachstumsperioden auftreten, welche man an den Jahrringbreiten erkennen kann. Zudem verursachen Äste im Holz weitere Störzonen.

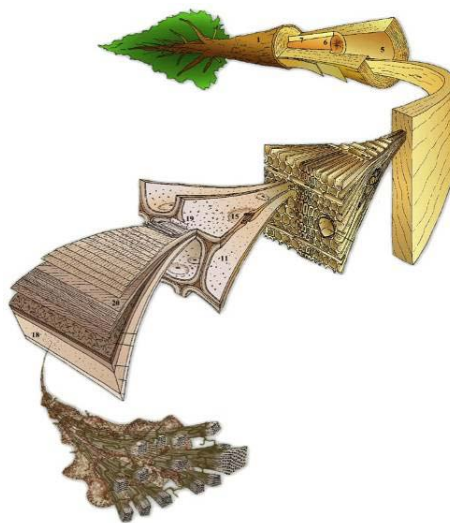


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbaus von Holz. (Quelle: Diss. J. Harrington)

3.1.1 Allgemein zu Nadel- und Laubholz

Nadelhölzer sind entwicklungsgeschichtlich gesehen älter als Laubhölzer. Sie besitzen daher einen einfacheren anatomischen Zellaufbau und nur zwei verschiedene Zellarten, die Tracheiden und die Parenchymzellen. Tracheiden sind langgestreckte an den Enden spitz zusammenlaufende Zellen. Sie übernehmen Festigungs- sowie Leitungsfunktionen im Baum. Sie haben einen Anteil von 90 bis 100 % im Holz. Der Wasseraustausch zwischen den Zellen erfolgt über Tüpfel. In den Holzstrahlen sorgen sie als Quertracheiden für den Wasser- und Nährstofftransport in radialer Richtung. Sie haben einen Anteil von 4 bis 12 % an der gesamten Holzsubstanz. Parenchymzellen sind in Längsrichtung meist rechteckige Zellen, welche die Leitung von Nährstoffen sowie die Speicherung von Stärke und Fetten übernehmen. In radialer Richtung bilden sie als Holzstrahlparenchym den Grossteil des Holzstrahlgewebes. Die Harzkanäle umgebenden Parenchymzellen sind tätig als Epithelzellen und produzieren Harz, welches sie in den Harzkanal ausscheiden (Abbildung 2). (WAGENFÜHR und SCHOLZ [1])

Das Laubholz ist entwicklungsgeschichtlich deutlich jünger als Nadelholz und wesentlich differenzierter als dasjenige des Nadelholzes. Man kann es in drei unterschiedliche Gewebetypen aufteilen, dem Leit-, Festigkeits- und Speichergewebe. Das Leitgewebe lässt sich noch einmal in drei Typen unterteilen. Den Gefässen (Tracheen), den Gefässtracheiden und den vasizentrischen Tracheiden. Die letzteren beiden sind Zwischenstufen in der Entwicklung von der Tracheide zum Gefäss. Das Festigungsgewebe besteht aus den zwei Zelltypen Libriformfasern und Fasertracheiden. Das Speichergewebe wiederum teilt sich in die folgenden drei Zellarten auf. Den Holzstrahlparenchymzellen, den Längsparenchymzellen und den Epithelzellen. Charakteristisch für Laubhölzer sind die Gefässe, welche in den Nadelhölzern noch nicht vorhanden sind. Sie sind normalerweise mit bloßem Auge als kleine Poren im Holzquerschnitt und als Rillen im Tangentialschnitt zu erkennen. Man unterscheidet hier je nach Anordnung dieser Tracheen:

- **Ringporige Hölzer** (Eiche, Esche, Robinie, Ulme)
Sie bilden im Frühholz weitleumige Gefässe, im Spätholz hingegen grösstenteils englumige Tracheiden und Holzfasern.
- **Halbringporige Hölzer**
- **Zerstreuoporige Hölzer** (Buche, Hagebuche)
Sie bilden während der ganzen Wachstumsphase Gefässe mit ungefähr gleichem Lumen.

Die Zuwachszonen (Jahrringmuster) sowie die artspezifische Anordnung von Poren- und Parenchymsträngen ergibt die charakteristische Maserung der verschiedenen Holzarten (Abbildung 2). (WAGENFÜHR und SCHOLZ [1])

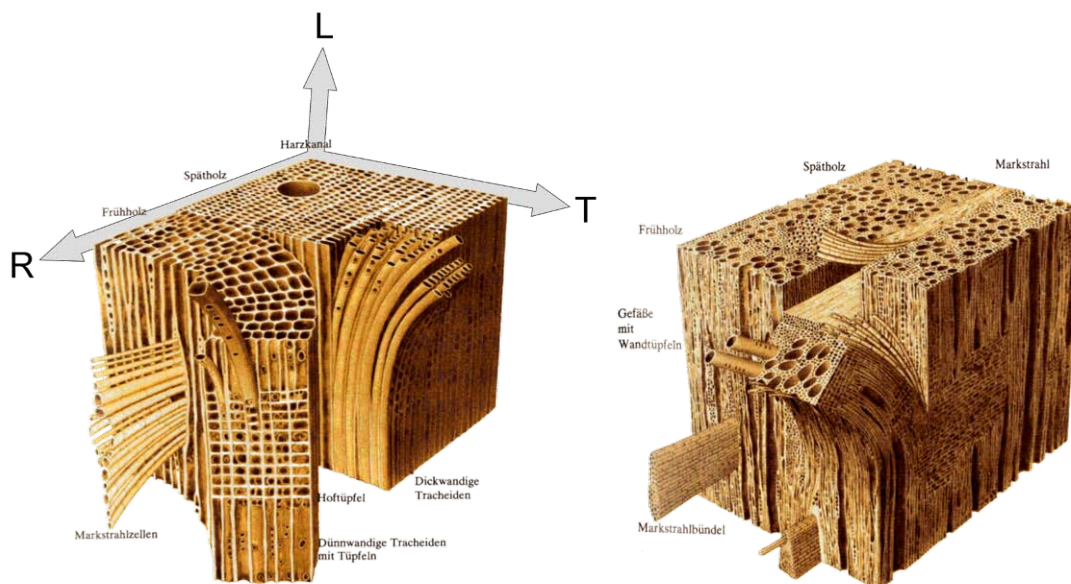


Abbildung 2: Schematische Darstellung des mikroskopischen Aufbaus von Nadelholz (links) und Laubholz (rechts) (Quelle: Das grosse Buch vom Holz; Martyn Branwell).

3.2 Alterung und Delaminierung von Klebstoffen

Die Alterung von Klebfugen wird nach dem Holzlexikon von LOHMANN [2] in die echte und scheinbare klebstoffbedingte Alterung unterteilt. Die echte klebstoffbedingte Alterung entsteht durch chemische oder physikalische Faktoren wie Licht, Wärme und Weichmacherwanderung. Es erfolgt eine Versprödung oder Erweichung der Klebfuge. Diese tritt jedoch bei erprobten Klebstoffsystemen kaum noch auf. Die scheinbare klebstoffbedingte Alterung wird durch äussere Einflüsse bei der Verarbei-

tung oder Nutzung bzw. durch Unverträglichkeit von Klebstoff und Füge­teil hervorgerufen. Zusätzlich zu den klebstoffbedingten Alterungen werden Klebverbindungen in der Praxis durch unterschiedlichste Faktoren beeinflusst wie:

- klimabedingte Quell- und Schwinderscheinungen der Füge­teile
- Feuchteunterschiede im Material
- strukturelle Unterschiede wie Dichte, Jahrringorientierung oder der einzelnen Füge­teile
- Temperaturbelastungen
- statische Belastungen (z.B. in biegebelastetem Brettschichtholz)
- Kriechen des Klebstoffes bei Langzeitbelastung

Neben der Problematik der hohen Holzfeuchte kann auch eine extrem niedrige Holzfeuchte durch dabei entstehende Schwindspannungen zu Problemen führen. So ist bekannt, dass es im Winter bei dreilagigem Parkett und extremer Trockenheit, erzeugt durch Fussbodenheizung (Temperaturen um 30°C und rel. Luftfeuchte von bis zu 20%), zur Rissbildung und Delaminierungen kommen kann (siehe Abbildung 3).

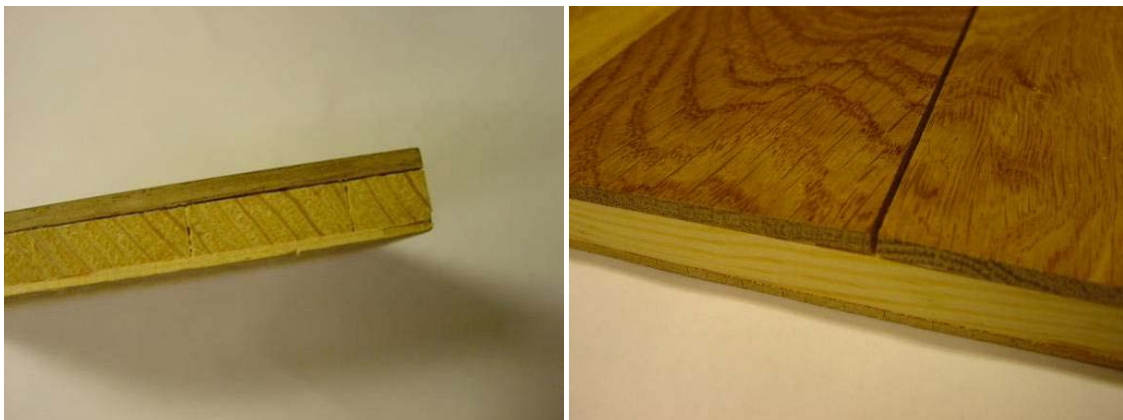


Abbildung 3: Fugenöffnung und Delaminierung in Parkett bei Fussbodenheizung (BLUMER [4]).

Auch bei BSH (Brettschichtholz) oder Massivholzplatten kann es unter extrem trockenen Bedingungen zu solchen Problemen kommen. Erfolgt zusätzlich zu den klimatisch bedingten Spannungen eine äussere Belastung, so überlagern sich diese und es kann zu einem Versagen des BSH kommen. Verstärkt wird der Effekt durch grosse Materialquerschnitte beim Einstellen eines Feuchteprofils und die sich dadurch aufbauenden Spannungen. Diese entstehen durch eine Schwindungs-

/Quellungsbehinderung der kreuzweise verklebten Schichten (z.B. bei Sperrholz, Massivholzplatten) sowie einen asymmetrischen Plattenaufbau. Aber auch unterschiedliche Jahrringlage (radial zu tangential) ist von Bedeutung, was GEREKE [3] in seiner Dissertation aufzeigt. Nach BLUMER [4] treten die geringsten Spannungen bei Parkett- und Massivholzplatten auf, wenn die Decklagen unter einem Winkel von 45° zwischen radialer und tangentialer Richtung orientiert sind. In dieser Winkellage besitzt das Holz den geringsten E-Modul senkrecht zur Faserrichtung (Abbildung 4).

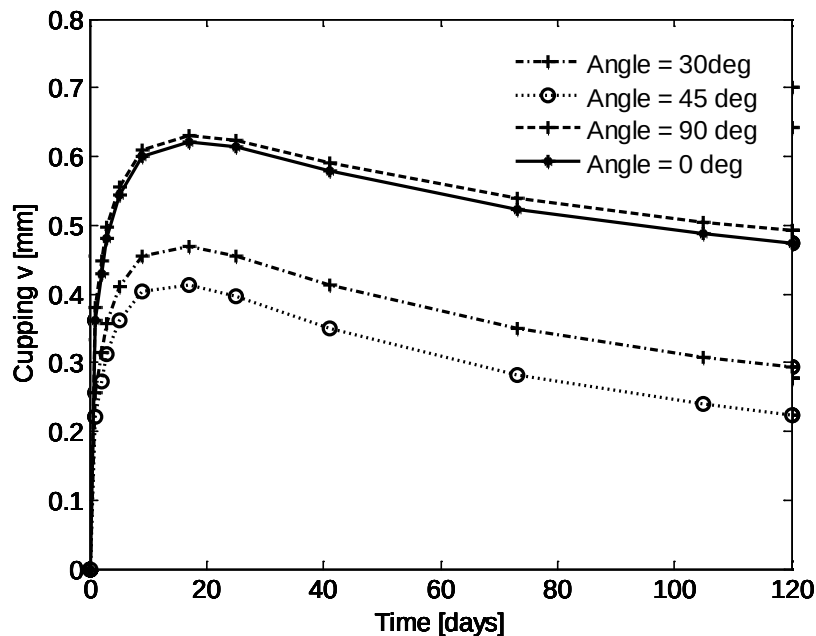


Abbildung 4: Berechnete Verformung von Parkett als Funktion der Jahrringlage (BLUMER [4]). Dabei ist die radiale Jahrringlage 90° und die tangentiale 0° .

Langzeittests wurden an der FMFA Stuttgart durchgeführt, dabei erfolgte eine Wechselklimalagerung in einem Glashaus und eine mechanische Belastung. Praktisch erfolgt meist eine Prüfung von Vollholzverbindungen nach DIN EN 204 oder DIN EN 302. Dabei werden meist verschiedene Schnelltests durchgeführt (z.B. Wasserlagerung), um den Alterungsprozess zu beschleunigen. In der Praxis kann es aber zu vielfältigen Überlagerungen von Beanspruchungen kommen, die nur schwer im Kurzzeitversuch nachvollziehbar sind.

3.3 Klebstoffe

Im praktischen Gebrauch erfolgt eine recht komplexe Beanspruchung der Klebefuge. Zu diesem Beanspruchungskomplex liegen bislang kaum Untersuchungen vor. Im Zusammenhang mit dem Halleneinsturz von Bad Reichenhall in Deutschland (2006), gewann die Thematik an Bedeutung, da auch ein Versagen der Klebfugen bei der Halle in Bad Reichenhall in die Diskussion über die Ursachen des Einsturzes einbezogen wurde. Untersuchungen zum Einfluss einer Dauerbelastung durch Klimawechsel und die dabei in der Klebfuge ablaufenden Vorgängen sowie zur Früherkennung solcher Erscheinungen mit Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung liegen bisher kaum Forschungen vor. Bekannt sind Probleme der Rissbildung in Holz unter äusserer Last und gleichzeitigem Klimawechsel (mechanosorptiver Effekt) und der Festigkeitsverlust von Harnstoffharzen durch Hydrolyse bei hoher Holzfeuchtigkeit. Daher werden Harnstoffharze nicht eingesetzt, wenn eine erhöhte Feuchtebelastung vorliegt. Arbeiten zur Überlagerung von mechanischer Belastung und von durch den mechanosorptiven Effekt bedingten zusätzlichen Eigenspannungen, die zur Herabsetzung der Tragfähigkeit im Wechselklima führen können, führten z.B. DILL- LANGER et al. [5] oder HANHIJARVI [6] durch.

Je nach Feuchtebeanspruchung der Klebefuge im späteren Einsatz werden bei HWS (Holzwerkstoffe) unterschiedliche Klebstoffsysteme eingesetzt. Bei Holzpartikelwerkstoffen erfolgt die Einteilung der zulässigen Werkstofffeuchte nach DIN 68800-2. Bei der Holzwerkstoffklasse 20 beträgt diese maximal 15%, bei der Holzwerkstoffklasse 100 maximale Feuchte 18% und bei der Klasse 100G maximal 21%. Für nicht tragende Verklebungen von Holz gelten die DIN EN 204 (Beanspruchungsgruppe D1 bis D4 für Thermoplastische Klebstoffe), DIN EN 12765 für duroplastische Klebstoffe (Beanspruchungsgruppe C1-C4) und für Klebstoffe im tragenden Bereich die DIN EN 301. Je nach Feuchtebeanspruchung in dem jeweiligen Einsatzgebiet der Verklebung, wird eine entsprechende Beanspruchungsgruppe gewählt. Im Allgemeinen werden für tragende und feuchteexponierte Elemente im Holzbau PF (Phenol-Formaldehyd-Harz), RF (Resorcin-Formaldehyd-Harz), MF (Melamin-Formaldehyd-Harz) oder PUR (Polyurethan) eingesetzt. Harnstoffharze gelten als nicht feuchtebeständig. Gemäss Angaben von Grøstad und Ormstad an der Konferenz *Wood Adhesives 2005* finden bei der Verklebung von BSH in Europa die

MF-Klebstoffe mit rund 63 % resp. MUF-Klebstoffe (Melamin-Harnstoff-Formaldehyde) den grössten Absatz. An zweiter Stelle auf dem Klebstoffmarkt, mit ca. 34 % Marktanteil, sind PRF-Klebstoffe (Phenol-Resorcin-Formaldehyd). An Bedeutung im konstruktiven Holzbau gewinnen zunehmend auch feuchtevernetzende 1K-PUR (Ein-Komponenten-Polyurethane). Diese werden seit den siebziger Jahren von der Firma Purbond in der Schweiz eingesetzt.

3.3.1 Bindungskräfte in Klebungen [7]

Nach HABENICHT [8] setzt sich die Gesamtfestigkeit des Verbundsystems Klebung neben der geometrischen Gestaltung und der Beanspruchung aus folgenden Einzelfestigkeiten zusammen:

- Festigkeit der Fügeiteile (Kohäsion des Holzes)
- Festigkeit der Grenzschichten (Adhäsion Holz - Klebstoff)
- Festigkeit der Klebschicht (Kohäsion des Klebstoffes)



Abbildung 5: Festigkeit einer Klebung nach HABENICHT [8]

Wie bei allen Verbundsystemen wird die Gesamtfestigkeit durch das schwächste Glied, in der Regel die in der Grenzschicht bestimmenden Adhäsionskräfte (Haftungskräfte), vorgegeben.

3.3.1.1 Adhäsion

Es gibt verschiedene Theorien, wie die Haftung von Klebschichten an den Fügeiteiloberflächen zustande kommt. Heute unterscheidet man drei Arten der Adhäsion: die mechanische Adhäsion, die Auto(ad)häsion und die spezifische Adhäsion (HABENICHT [8]). Dabei umfasste Letztere die beiden anderen Theorien.

mechanische Adhäsion Diese Theorie wird hauptsächlich in Verbindung mit porösen und rauen Materialien wie z.B. Holz verwendet. Sie sieht die Verankerung des ausgehärteten Klebstoffs in den Poren, Kapillaren oder Hinterschneidungen als Hauptursache für die Festigkeit zwischen Klebschicht und Holzoberfläche (DUNKY und NIEMZ [9]).

Der Zusammenhalt zwischen glatten Oberflächen und Klebstoff wird mit dieser alten Theorie jedoch nicht begründet (HABENICHT [8]). Vielmehr bilden sich durch die Vergrößerung der Oberfläche Bindungen aus, auf denen die Autohäsion und die spezifische Adhäsion beruhen.

Autohäsion

Voraussetzung für diese Theorie ist eine grosse Beweglichkeit der Makromoleküle, welche unter Druck gegenseitig diffundiert (HABENICHT [8]). Bei Holzverklebungen ist diese Theorie auf die amorphen Polymere des Holzes (Lignin und Hemizellulosen) und das amorphe Bindemittel beschränkt (DUNKY und NIEMZ [9]).

spezifische Adhäsion

Diese beruht auf chemischen, physikalischen und thermodynamischen Gesetzmässigkeiten. Der Wirkungsbereich der Haupt- und Nebenvalenzbindungen liegt bei 0.2–1 nm. Folgende Bildungsmechanismen werden von (HABENICHT [8]) aufgeführt:

- zwischenmolekulare Kräfte im Grenzschichtbereich
- chemische Bindungen der Klebstoffmoleküle mit Molekülen der Füge-teiloberfläche (Chemisorption)
- mikromechanischer Formschluss von Polymerstrukturen und der Grenzschicht der Füge-teiloberfläche (mechanische Adhäsion)
- Kraftwirkung der Dipole von Atomen/Molekülen
- gegenseitige Diffusion der Makromoleküle von Klebschicht und Füge-teil (Auto(ad)häsion)

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Adhäsion durch intermolekulare und interatomare Kräfte zwischen den Molekülen und Atomen der beiden Materialien zustande kommt. Zu diesen Kräften gehören Wasserstoffbrücken, Van-der-Vaals-

Kräfte, elektrostatische Kräfte sowie Ionen-, Atom- und Metallkoordinationsbindungen (DUNKY und NIEMZ [9]).

3.3.1.2 Kohäsion

Unter Kohäsion wird das Wirken von Anziehungskräften zwischen Atomen, bzw. Molekülen innerhalb eines Stoffes verstanden (HABENICHT [8]). Die Kohäsion wird deswegen auch als innere Festigkeit bezeichnet und ist werkstoff- und temperaturabhängig.

Je nach chemischer Struktur der Klebfuge ist das Zusammenwirken von kovalenten und zwischenmolekularen Bindungskräften verschieden (DUNKY und NIEMZ [9]). Weiter steigt die Kohäsionsfestigkeit mit zunehmender Molmasse des Polymers. Bei Temperaturanstieg sinkt die Kohäsionsfestigkeit aufgrund der steigenden Molekülbeweglichkeit und dem geringer werdenden Molekülzusammenhalt.

Fehlstellen in der Klebfuge entstehen durch ungleiche Vernetzung, eingeschlossene Lösungsmittelreste oder sehr unterschiedliche Kettenlängen. Als Folge der Eigenspannungen sinkt die Festigkeit der Klebfuge und Kohäsionsbrüche können sich ausbreiten (HABENICHT [8]).

3.3.2 Einflussfaktoren auf die Eigenschaften von Holzverklebungen

Marra in DUNKY und NIEMZ [9] teilte 1992 die bei der Verklebung auftretenden Einflussfaktoren in sechs Gruppen ein. Gemäss seiner Gleichung setzt sich die Bindefestigkeit des Verbundes aus den Summen der einzelnen Einflussgruppen und den theoretischen Adhäsionskräften zusammen (DUNKY und NIEMZ [9]).

Tabelle 1: Beschreibung der einzelnen Gruppen in der „Equation of Performance“ nach Marra in DUNKY und NIEMZ [9].

<i>Eigenschaften des Klebstoffes</i>	Viskosität, Aushärteverhalten (Reaktionsmechanismen, Geschwindigkeit, Aushärtegrad), Festigkeit, Beständigkeit, pH-Wert, Lösungsmittel, Füllstoffe und Streckmittel, Katalysatoren/Härter, Feststoffgehalt, rheologisches Verhalten, Oberflächeneigenschaften u.a.
<i>Holzeigenschaften</i>	Holzart, Festigkeit, Dichte, Kern- und Splintholz, Früh- und Spätholz, Durchlässigkeit, pH-Wert, Alter, Holzinhaltsstoffe, Holzbestandteile (Zellulose, Lignin), Hygroskopizität, Anisotropie, biologischer Abbau, Äste, dielektrische Eigenschaften, Kriech- und Relaxationsverhalten u.a.
<i>Vorbereitung des Holzes</i>	Auftrennen, Oberflächeneigenschaften (Rauigkeit, Beschädigungen, Ebenheit, Verunreinigungen), Faserwinkel, Feuchtigkeit, Alter der Oberfläche, Temperatur, Oberflächenbehandlungen u.a.
<i>Anwendung des Bindemittels</i>	Lagerung, Mischung, Anwendung, Wartezeit (offen, geschlossen, halboffen), Umgebungstemperaturen, Druck, -temperatur, -zeit, Konditionierung u.a.
<i>Geometrische Beschreibung der Holzkomponente</i>	Grösse, Gestalt der Strukturelemente, Lage der Schnittfläche, Anzahl und Anordnung der Furnierlagen, Struktur und Aufbau des Holzwerkstoffes u.a.
<i>Bedingungen während des Einsatzes der hergestellten Produkte</i>	äussere und innere Spannungen (Spannungsart, Einwirkungsweise und -dauer), Kriech- und Relaxationsverhalten, Umgebungsbedingungen (Wärme, Feuchtigkeit, chemischer- und biologischer Angriff, Strahlung)

3.3.3 Klebstoffeinteilung

In den folgenden Unterkapiteln wird eine kurze Übersicht über den Aufbau und die Eigenschaften von chemisch reagierenden synthetischen Klebstoffen gegeben, welche auch im experimentellen Teil dieser Arbeit eingesetzt wurden.

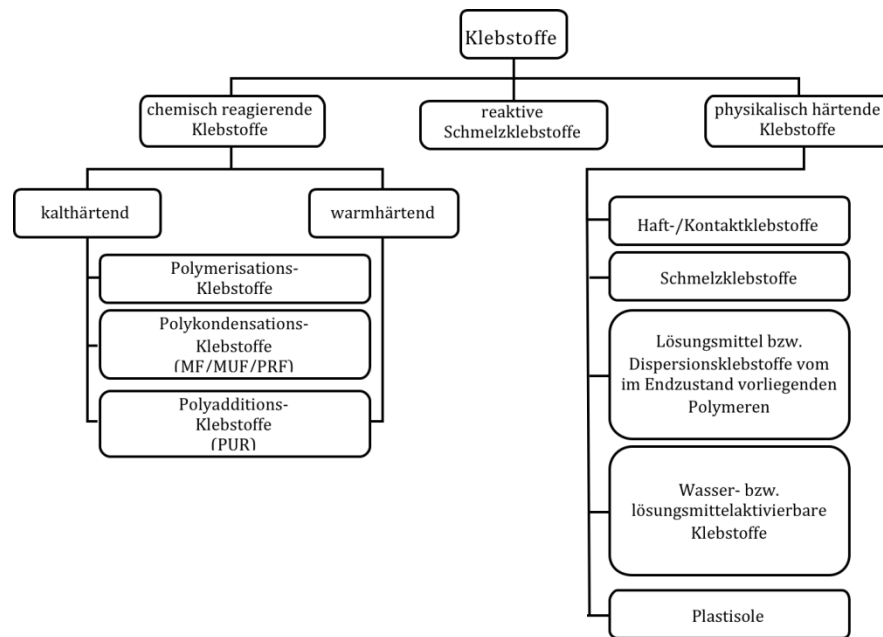


Abbildung 6: Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Aushärtungsmechanismus. (Brockmann et. al. [16])

3.3.3.1 Polykondensationsklebstoffe

Bei der Polykondensation reagieren verschiedene Verbindungen wie Harnstoff, Melamin, Phenol oder Resorcin, bzw. deren Kombinationen, mit Formaldehyd zu Polykondensaten. Die Reaktion verläuft stufenweise unter Abspaltung von Wasser (KRATZER und IBOLD [10]). Um eine verfrühte Aushärtung zu vermeiden, wird die Reaktion im Resol-Zustand vom Hersteller unterbrochen (WITTCHEN et. al. [11]). Durch Zugabe eines Härters und/oder Wärme bzw. Druck wird die Polykondensation zu Ende geführt. Das Ergebnis des duroplastischen Aushärtens ist ein räumlich dreidimensionales, unlösliches und unschmelzbares, netzartiges Makromolekül (DUNKY und NIEMZ [9]).

Tabelle 2: Schubmodule von Klebstoffen nach CLAD [12]

Klebstoffe	Schubmodul für dünne Klebfugen an Holzverleimung gemessen in N/mm ²
Harnstoffharz	2100
Harnstoffharz mit 15 % PVAc	1350
Harnstoffharz mit 30 % PVAc	730
Melaminharz	2178
Resorcinharz mit 15 % Holzmehl	1265
Glutinleim	701
Kaseinleim	1619

Melamin-Formaldehyd- (MF) / Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze (MUF)

UF-Harze (Harnstoff, lat. Urea) werden in der Holzwerkstoffindustrie, insbesondere bei der Herstellung von Spanplatten, Sperrholz und Furnierverklebungen verwendet. Sie zeichnen sich nach DUNKY und NIEMZ [9] unter anderem durch harte, farblose Klebfugen, eine hohe Temperaturbeständigkeit und einen niedrigen Preis aus. Neben vielen weiteren positiven Eigenschaften, welche für den weltweiten Einsatz dieser Harze verantwortlich sind, weisen Formaldehyd-Kondensationsharze auch verschiedene Nachteile auf. So werden nach HABENICHT [8] bei der Verarbeitung geringe Mengen an überschüssigem Formaldehyd freigesetzt, wodurch Beschwerden wie Augenbrennen, Stechen in der Nase und im Hals auftreten können (BUNDESAMT FÜR GESUNDHEIT [13]). Zudem verhalten sich UF-Harze, aufgrund der engmaschigen Struktur der Molekülketten spröde und zeigen eine geringe Feuchtebeständigkeit. Bei Anwendungen unter erhöhter Luftfeuchtigkeit ist daher eine Zugabe von Melamin erforderlich. Reine MF-Harze werden aus Kostengründen selten verwendet. Vielmehr kommen mit Melamin modifizierte UF-Harzen zum Einsatz (MUF). (DUNKY und NIEMZ [9]).

Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze (PRF)

Phenol-Formaldehyd-Harze (PF) bilden die Basis der ältesten synthetischen Makromoleküle (Bakelite). Sie finden im Klebstoffbereich seit mehr als 80 Jahren vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Ihre hohen Festigkeiten, die ausgezeichnete Haftung und ihre hohe Feuchtigkeits- und Witterungsbeständigkeit sind wesentliche Voraussetzungen für den Einsatz im konstruktiven Holzbau und Holzbootsbau (MÜLLER und RATH [14]). Dank teilweiser Substitution von Phenol durch das reaktivere und teurere Resorcin, können kalthärtende Harze (PRF) erzeugt werden (DUNKY und NIEMZ [9]). Wie auch bei den aminoplastischen Harzen (UF, MF/MUF) erweisen sich die Formaldehydemission und die lange Presszeit jedoch als wesentliche Nachteile. Dazu kommt die rotbraune Farbe der Klebfuge, welche sich stark von hellen Hölzern abhebt.

3.3.3.2 Polyadditionsklebstoffe

Unter den Polyadditionsklebstoffen sind bei Holzverklebungen, besonders im Ingenieurholzbau, die Polyurethanklebstoffe (PUR) von Bedeutung (SCHMAUS et al. [15]). Gegenüber den klassischen Formaldehydharzen hat diese Klebstoffklasse gemäss BROCKMANN et al. [16] folgende Vorteile:

- geringe Auftragsmengen
- nahezu verlustfreie Anwendung
- Einsetzbarkeit ohne Mischprozess, wie vom Hersteller angeliefert – kein Bedarf für Leimküche, kein Abwasser
- wählbar kurze bis extrem kurze Aushärtungszeiten
- unauffällige Klebfuge mit holzähnlichem Alterungsverhalten
- Zulassung für Innen- und Aussenanwendungen
- ökologische Unbedenklichkeit (formaldehyd-frei)

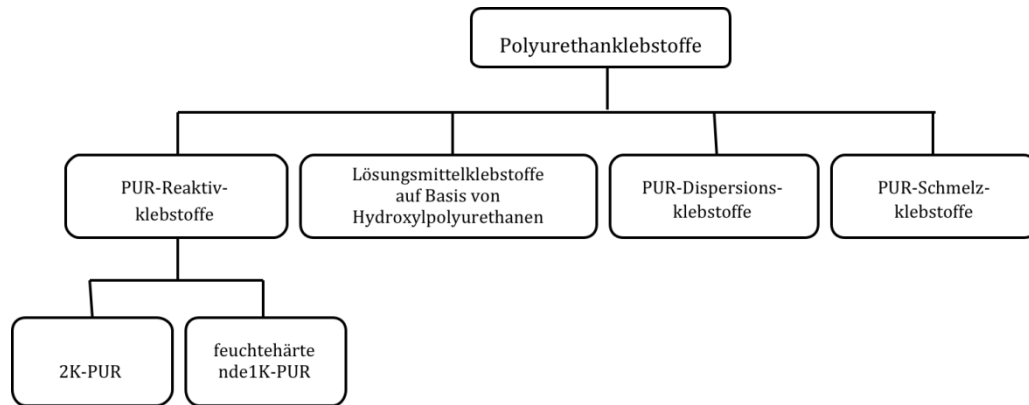


Abbildung 7: Unterscheidung der Polyurethanklebstoffe nach MEIER-WESTHUES [18]

Zweikomponenten-Polyurethan-Reaktivklebstoffe (2K-PUR)

2K-PUR entstehen durch die Polyaddition von niedermolekularen Isocyanaten (Härter-Komponente) mit ebenfalls niedermolekularen Polyolen (Binder) (WAGENFÜHR und SCHOLZ [17]). Im Unterschied zur Polykondensation werden hierbei keine Nebenprodukte abgespalten. Die Monomere (Härter u. Binder) schliessen sich durch Verschieben der Atome und Elektronenpaare zu kurzen Molekülketten, sogenannten Oligomeren, zusammen. Da jedes Zwischenprodukt, egal aus wie vielen Monomeren es besteht, an jedem Ende je eine funktionelle Gruppe besitzt, können auch Kettenstücke unterschiedlicher Länge miteinander reagieren, bis schliesslich langkettige Polyurethane entstehen (KRATZERT und IBOLD [10]).

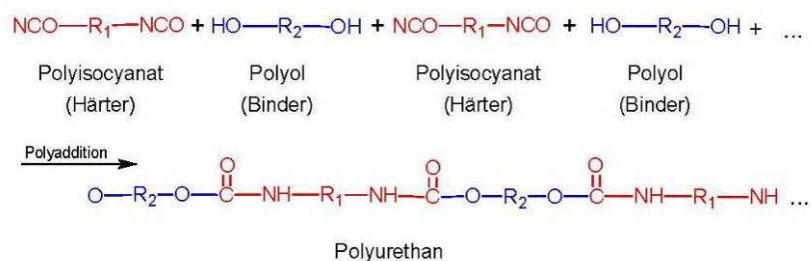


Abbildung 8: Polyaddition von 2K-PUR (WEISS et al. [19])

Neben den Verarbeitungsbedingungen (Temperatur, Mischtechnik) bestimmen die Struktur, Kettenlänge und Funktionalität der Monomere, über die Konzentration der Urethangruppen, sowie über die chemische Vernetzungsdichte, die Eigenschaften des vernetzten Polymers. Weiter werden den Reaktanden oft Füllstoffe wie Kreide, Talkum, Schwespat, Quarzmehl oder Schiefermehl beigemischt, wodurch die Stei-

figkeit des Klebstoffs zunimmt. Als ungewünschte Nebeneffekte nehmen oft die Bruchdehnung und der Schälwiderstand ab. Diese werden allerdings durch die geringere Schwindung beim Abbinden, die verminderte Wärmeabgabe und den preisgünstigeren Klebstoff wettgemacht. Katalysatoren auf Basis von tertiären Amin-Verbindungen und Metallsalzen haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Endfestigkeit und Verarbeitbarkeit (Tropfzeit) des Klebstoffes (MEIER-WESTHUES [18]).

Feuchtehärtende Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffe (1K-PUR)

1K-PUR-Systeme werden bei Raumtemperatur oder nur leicht erhöhter Temperatur verarbeitet. Sie bestehen aus Polyisocyanato-Polyurethanen, also NCO-Prepolymere, deren Ketten oft durch Vorreaktion zu Oligomeren verlängert sind. Durch Reaktion der freien Isocyanatgruppen reagieren die Prepolymere mit der Luft- bzw. Substratfeuchte unter Ausbildung von Polyharnstoffgruppen (MEIER-WESTHUES [18]). Dabei wird als Nebenprodukt CO_2 freigesetzt, das zu einem Aufschäumen des Klebstoffes führt (WEISS et al. [19]). Bei HWS liegt der freie Isocyanatgehalt (NCO-Gehalt) des Klebstoffs zwischen 4–15 % - einem Kompromiss zwischen guter Vernetzung und erhöhter CO_2 -Emission (SCHMIDHEINY [20]).

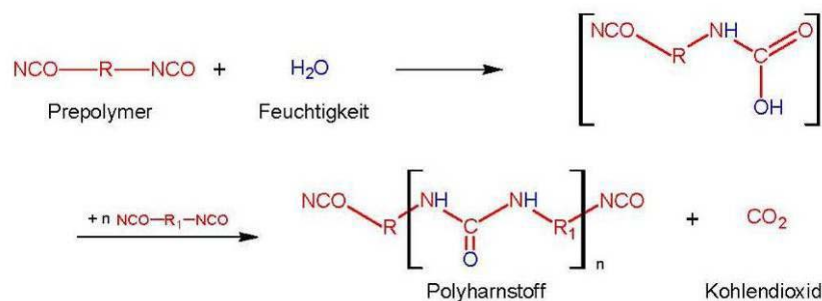


Abbildung 9: Polyaddition von 1K-PUR (WEISS et al. [19])

Die Härtung der Klebschicht verläuft von aussen nach innen und wird wesentlich durch die Reaktivität der NCO-Prepolymere, die Katalyse und die Diffusionsgeschwindigkeit des Wassers in die Klebschicht bestimmt (MEIER-WESTHUES [18]). Ferner muss während der Polyaddition die Verfügbarkeit der Prepolymere (Polyisocyanat, Polyol) und des Wassers gewährleistet sein, damit ein stabiles Netzwerk aus quervernetzten Molekülketten entsteht.

4 Material und Methodik

Die Versuche können in drei Teile eingeteilt werden. Im **ersten Teil**, den Vorversuchen, wurde die Möglichkeit getestet mittels der Ultraschallmessung Fehlverklebungen in Holzverklebungen zu orten. Dabei sollten die Fehlverklebungen delaminierte Stellen in einer Klebefuge simulieren. Aus diesem Vorversuch heraus erhoffte man sich die erkennbare Grösse einer delaminierte Stelle in einer Klebefuge zu ermitteln.

In **zweiten Teil**, den Hauptversuchen, wurden zwei Methoden zur künstlichen Alterung von Klebstoff untersucht und mit Klebstoffen nach einer natürlichen Bewitterung verglichen. Zudem wurde die Klebfuge mit zwei zerstörungsfreien Methoden (Durchschallen, Eigenfrequenz) auf möglich aufgetretene Delaminierungen untersucht.

Im **dritten Teil**, den ergänzenden Versuchen, wurde die Ortung von Fehlverklebungen an BSH in realen Dimensionen untersucht. Ein Teil der BSH war fehlerfrei, andere beinhalteten stellenweise Holzfehler, um deren Auswirkungen auf die Messergebnisse zu beurteilen. Dabei wurde exemplarisch mit verschiedensten zerstörungsfreien Messmethoden versucht, die Grenzen und Schwierigkeiten der Methode auf zu zeigen.

Zusätzlich wurden chemische Analysen der eingesetzten Klebstoffe, vor und nach einer Schnellalterung, an BSH mittels Delaminierungsprüfung nach EN 301 und EN 302-2 an der BFH AHB Biel durchgeführt.

4.1 Holz [30]

4.1.1 Buche (*Fagus sylvatica* L.)

Buche, auch Rotbuche oder gemeine Buche genannt, ist in Europa weit verbreitet und macht 16,2% des Holzvorrates im Schweizerwald aus (KUCERA et. al. [21]). Die Holzstrahlen sind gut erkennbar, die Jahrringe ringporig und nehmen an Zahl und Grösse zum Spätholz hin zu (WAGENFÜHR [22]). Dank seinem hohen Biegeelastizitätsmodul findet es im Bauwesen an hoch beanspruchten Stellen Verwendung (z.B. Knotenplatten), auch als Möbelholz ist es beliebt. Hingegen ist die Buche schwach resistent gegen Pilz- und Insektenbefall.

4.1.2 Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.)

Fichte, auch unter dem Namen Rottanne oder -fichte bekannt. Fichte stellt in der Schweiz die am meisten verwendete Holzart dar und macht knapp die Hälfte des Schweizer Holzvorrates aus. Neben seiner hohen Verfügbarkeit zeichnet sich Fichtenholz durch gute mechanische Eigenschaften, rasche Trocknung und sehr gute Verleimbarkeit aus. Negativ ist die Empfindlichkeit gegenüber Insekten- und Pilzbefall (KUCERA et. al. [21]).

Tabelle 3: Übersicht der Kenndaten der verwendeten Hölzer (KUCERA et. al. [21]):

	Buche	Fichte
Darrdichte [g/cm^3]	0.64...0.72	0.30...0.64
Differentielles Schwindmass [%/%]:		
radial	0.19...0.22	0.15...0.19
tangential	0.38...0.44	0.27...0.36
Biegeelastizitätsmodul [kN/mm^2]	12.3...16.4	10.0...12.0
Scherfestigkeit [N/mm^2]	7.7...10.0	5.0...7.5

4.2 Klebstoffe

Tabelle 4: Verwendete Klebstoffe und ihre Verarbeitungsparameter

Klebstoffart:			1-K PUR		MUF	PRF
Hersteller:			Purbond		Türmerleime	Dynea
Klebstoff:	Klebstoff		HB 110	HB 181	Kauramin 683 ¹	Prefere 4040 ²
	Härter		-	-	Kauramin 688	Prefere 5839
Auftrag:			einseitig	einseitig	einseitig	einseitig
Auftragsmenge:	g/m ²		200	250	250	250
Pressdruck:	N/mm ²	Fichte	0.8	0.8	0.8	0.8
		Buche	-	1,2	1.2	1.2
Presszeit:	h		3	6,5	5,5	5
Mischung:	Gewichts-%	Klebstoff	-	-	100	100
		Härter	-	-	50	20
max. offen Zeit:	h		-	2	2	60
Aushärtezeit:	h		48	48	-	-

4.3 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte der verwendeten Holzarten wurde mit Hilfe der Darmmethode nach der DIN 52 183 ermittelt. Dabei wurde die Holzfeuchte nach der Formel 1 bestimmt.

$$\omega = \frac{m_u - m_0}{m_0} \quad \text{Formel 1}$$

ω : Holzfeuchte [%]

m_0 : Holzmasse darrtrocken [g]

m_u : Holzmasse bei Holzfeuchte ω [g]

¹ Konzentration (Trockengehalt nach ISO 3251) 66.5 ±1%

² Konzentration 56-58%

4.4 Dichte

Zur Bestimmung der Dichte wurde das Volumen und die Masse der Zugscherproben beim Zugscherversuch aufgenommen. Anschliessend wurde nach der Formel 2 die Dichte bestimmt. Die Dichte wurde im Normalklima, also bei 20°C und 65% rLf. (relative Luftfeuchte) ermittelt.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Formel 2}$$

ρ : Dichte [g/cm³]
 m : Masse [g]
 V : Volumen [cm³]

4.5 Vorversuch:

Ermittlung der Zuverlässigkeit von Ultraschall zur Detektierung von Fehlstellen in Klebfugen

Durch definierte Fehlverklebungen sollte die Eignung der Ultraschalltechnik für die Erkennung von Verklebungsfehlern oder Delaminierungseffekten untersucht werden. Es erfolgte die Prüfung verschiedener Prüfkörper-Varianten mit unterschiedlichen Messgeräten³.

Entsprechend den Empfehlungen verschiedener Autoren (CLAUSS et al., 2007; HASENSTAB, [23]; AICHER et al. [24]) wurde zur Charakterisierung der Fehlverklebungen der Parameter Schalllaufzeit bzw. -geschwindigkeit ausgewählt.

4.5.1 Material

Das untersuchte Probenmaterial wurde aus Fichte hergestellt. Das Material wurde sowohl vor der Bearbeitung als auch nach der Fertigstellung im Normalklima (20 °C/ 65 % rLf) konditioniert, die Messungen erfolgten unter den gleichen Bedingungen. Die fertigen Prüfkörper wiesen Abmessungen von 500 x 100 x 10 mm auf. Sie be-

³ Zusätzlich wurden alle Prüfkörper vom Projektpartner EMPA (Departement Informations-, Zuverlässigkeits und Simulationstechnik; Abteilung Elektronik/Messtechnik/Zuverlässigkeit; Dr. Neuschwander) mittels berührungsloser Ultraschall-Techniken untersucht. Die Untersuchungsergebnisse stehen derzeit noch aus.

standen aus je zwei Lamellen gleicher Dicke bzw. aus einer Lamelle doppelter Dicke. Es wurden die nachfolgenden vier verschiedenen Prüfkörpertypen untersucht:

A: massive, unverklebte PK

B: vollflächig verklebte PK

C: auf halber Länge verklebte PK

D: nur an den Rändern in Längsrichtung (ca. 2.5 cm) verklebte PK

In Abbildung 10 sind die verschiedenen Aufbauten dargestellt, die rot schraffierten Bereiche kennzeichnen die unverklebten Klebfugen. Alle Prüfkörper sind frei von Ästen und weisen überwiegend stehende Jahrringe ($\alpha = 90^\circ \pm 15^\circ$) auf, d.h. die Durchschallung der Klebfuge erfolgte in tangentialer Richtung. Als Klebstoff wurde PUR HB 110 verwendet. Der Pressdruck betrug $0,8 \text{ N/mm}^2$, die Pressdauer 3 Stunden. Bei einseitigem Auftrag wurden 200 g/m^2 Klebstoff aufgetragen.

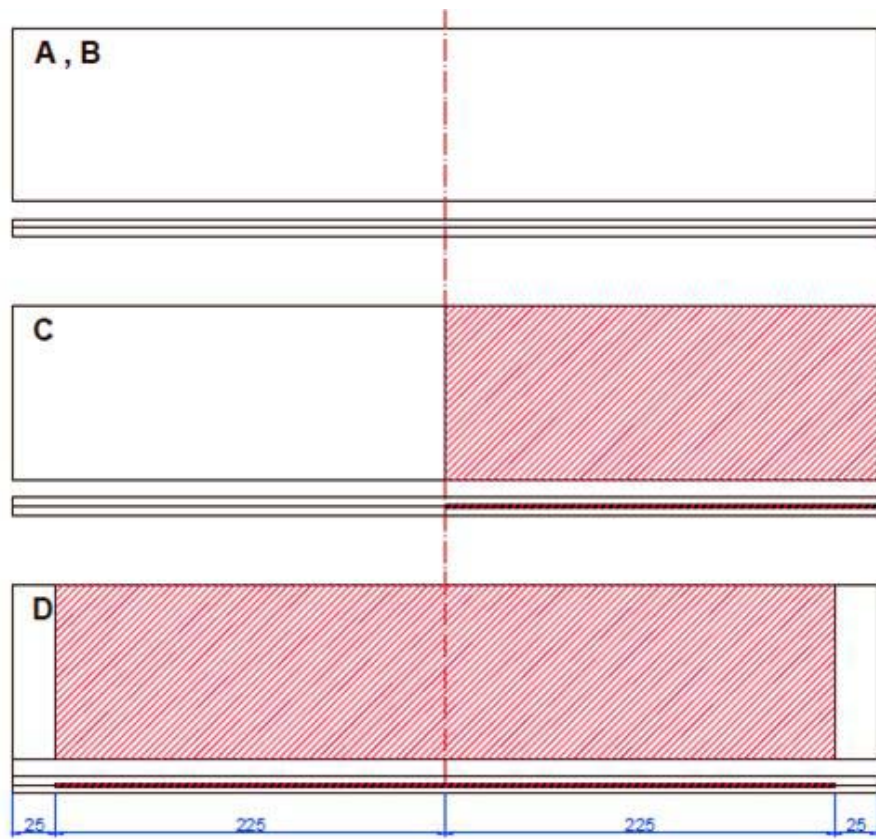


Abbildung 10: Aufbau der Prüfkörper-Varianten A-D

4.5.2 Methodik

Durchschallung mit dem Ultraschallgerät PCUS 10NF

Die Untersuchung wurde mit dem Ultraschallgerät PCUS 10NF des Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) Saarbrücken, EADQ Dresden, durchgeführt. Abbildung 11 stellt den Versuchsaufbau dar.

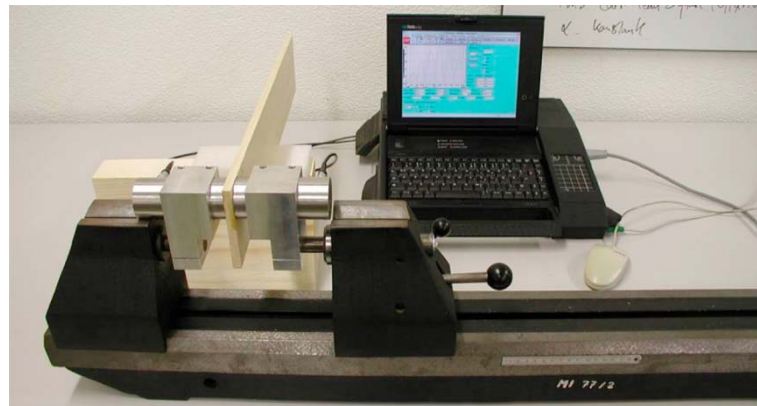


Abbildung 11: Versuchsaufbau PCUS 10NF

Für die Transmissionsmessungen wurden Ultraschallpulse in Ausbreitungsrichtung rechtwinklig zur Faser eingebracht. Die Durchschallung erfolgte mittels Longitudinalwellen, die Prüfkörper wurden mit dem Ultraschall-Sender/Empfänger-Paar punktweise nach dem Schema in Abbildung 3 abgerastert. Die Laufzeitmessung fand an der, auf 80 % verstärkten, dritten Flanke bei einer Blende von 40 % statt. Die Frequenz betrug 100 kHz, die Vorlaufzeit 23.55 μ s. Die Ankopplung der Prüfköpfe erfolgte mit dem Ultraschall-Koppelmittel ZG-F der Fa. Krautkrämer.

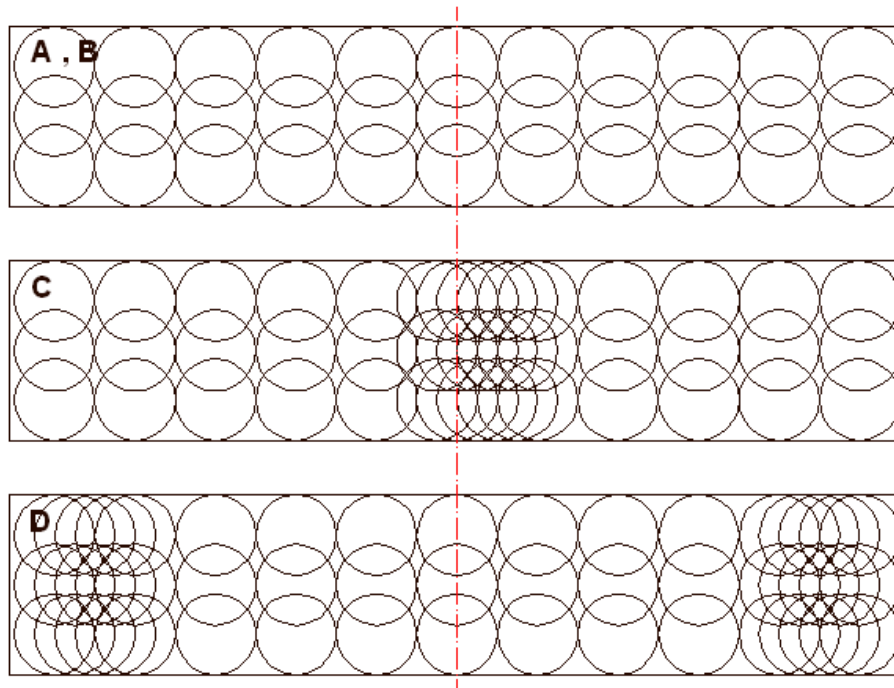


Abbildung 12: Abtastschemata der Prüfkörper-Varianten

Die Kreise stellen die jeweilige Lage der Prüfköpfe dar. Der Abstand der Messpunkte betrug im Normalfall 4.5 cm, in den Übergangsbereichen etwa 1.1 cm. Die Laufzeiten der Kreismittelpunktkoordinaten bilden die Grundlage für die visuelle Darstellung mittels MATLAB® R2008a.

Exemplarisch erfolgte die Messung der Kombination zweier Prüfkörpertypen (C/D), welche ohne Koppelmittel zusammengelegt wurden. Somit konnten die Effekte von verdoppelter Lamellenanzahl sowie von mehreren Fehlstellen in verschiedenen Klebfugen beobachtet werden (Abbildung 13).

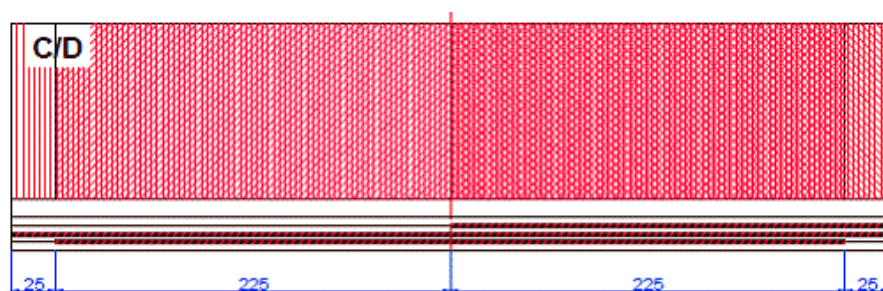


Abbildung 13: Aufbau der Prüfkörper-Kombination C7/D9

4.6 Hauptversuch:

Untersuchung der Alterung an Klebfugen

Im Hauptversuch wurden zweilagige Proben mit der Dimension 320 x 125 x 10 mm und unterschiedlichen Klebstofftypen verklebt. Diese Proben wurden verschiedenen natürlichen oder künstlichen, zyklischen Klimate ausgesetzt. Die zyklischen Klimabedingungen sollen durch Schwind- und Quellsbewegungen des Holzes Eigenspannungen in der Klebfuge hervorrufen, die wiederum zu Delaminierungserscheinungen führen können. Mit Hilfe von verschiedenen zerstörungsfreien Messverfahren wurde versucht, eine entstandene Delaminierung in der Klebfuge zu orten. Anschliessend wurden aus den Brettern Zugscherproben nach der DIN EN 302-1 geschnitten und auf ihre Scherfestigkeit hin geprüft.

4.6.1 Material

Das untersuchte Probematerial wurde aus Fichten- und Buchenholz hergestellt. Das Material wurde sowohl vor der Bearbeitung als auch nach der Fertigstellung im Normalklima (20 °C/ 65 % rLf.) konditioniert, die Messungen erfolgten unter den gleichen Bedingungen. Die fertigen Probenbretter wiesen eine Abmessung von 320 x 125 x 10 mm auf. Sie bestehen aus je zwei Lamellen gleicher Dicke. Zu Referenzzwecken wurden zusätzlich Probepretter der gleichen Dimension und Holzarten, aber ohne Klebfuge hergestellt. Alle Probenbretter sind frei von Ästen und wiesen überwiegend stehende Jahrringe ($\alpha = 90^\circ \pm 15^\circ$) auf. Die Durchschallung der Klebfuge erfolgte in tangentialer Richtung. Es wurden die Klebstoffe in Tabelle 4 verwendet.

4.6.2 Methode

4.6.2.1 Schnellalterungstests

Natürliche Bewitterung

Die natürliche Bewitterung wurde an einem Bewitterungsstand auf dem Dach des HIF-Gebäudes an der ETH Zürich Höggerberg durchgeführt. Der Bewitterungsstand (Abbildung 14) bestand aus Metallrohren, die zu einem Gestell zusammengeschraubt waren. Dieses Gestell bildete eine ca. 45° geneigte Fläche, die mit einem Metallgitter überzogen war. An diesem Gitter wurden die Probenbretter

mittels zweier Hackenschrauben befestigt. Die Fläche des Gitters betrug 2 x 1 m und war nach Norden ausgerichtet.

Der Versuch lief über einen Zeitraum von 150 Tagen (Februar 2009 bis Juli 2009). Dabei wurde alle 30 Tage eine Entnahmeserie entnommen. Insgesamt wurden fünf Serien entnommen. Auch hier wurde eine Null-Entnahme vorgenommen, also Probenbretter, die keiner natürlichen Bewitterung ausgesetzt war. Diese dienten als Referenzproben.



Abbildung 14: Bewitterungsstand auf dem Dach des HIF-Gebäudes der ETH Zürich.

Künstliche Bewitterung

Eine Faustregel sagt aus, dass ein Monat künstliche Bewitterung drei Monate natürliche Bewitterung simulieren kann. Eine allgemein gültige Korrelation zwischen künstlicher Bewitterung und natürlicher Bewitterung kann aber nicht erwartet werden. Da eine grosse Anzahl von Einflussfaktoren bei einer natürlichen Bewitterung vorhanden sind, die in einer künstlichen Bewitterung nicht nachgeahmt werden können. Dennoch ist es sinnvoll eine künstliche Bewitterung durchzuführen. Im Gegensatz zur natürlichen Bewitterung können die Prüfergebnisse auf definierte Parameter zurückgeführt werden und sind so besser reproduzierbar.



Abbildung 15: Anlage zur künstlichen Bewitterung an der AHB in Biel (Q-SUN 3100 Xenon Test Chamber der Firma Q-Panel LAB Products).

Die künstliche Bewitterung wurde an der BFH AHB Biel im Bewitterungsschrank Q-SUN 3100 Xenon Test Chamber der Firma Q-Panel LAB Products durchgeführt (Abbildung 15). Die Bewitterungsdauer und der Bewitterungszyklus (Tabelle 5) wurden an die Norm DIN EN 927-6 angelehnt.

Die Gesamtdauer der künstlichen Bewitterung betrug 1680 Stunden (=10 Wochen). Das bedeutet, dass insgesamt 10 Bewitterungszyklen gefahren werden müssen, da ein Zyklus 168 Stunden (=1 Woche) dauert. Ein Zyklus bestand aus 56 Wiederholungen der UV-Bestrahlung A und der Besprühung B. Die Entnahmen waren in einem zweiwöchigen Rhythmus angelegt. Als eine Entnahme nach 2, 4, 6, 8, 10 Wochen oder anders ausgedrückt nach je 112 Wiederholungen des Zykluses A und B. Ebenfalls wurde auch hier eine Null-Entnahme vorgenommen, also Probenbretter, die keinem Zyklus der künstlichen Bewitterung ausgesetzt waren. Diese dienten als Referenzproben.

Tabelle 5: Bewitterungszyklus für die künstliche Bewitterung in Anlehnung an die DIN EN 927-6

Stufe	Funktion	Temperatur	Dauer	Bedingungen
1	Kondensation	$(45\pm3)^{\circ}\text{C}$	24h	
2	Unterzyklus A und B		144h bestehend aus 48 Zyklen von je 3h der Stufen A und B	
A	UV-Bestrahlung	$(60\pm3)^{\circ}\text{C}$	2.5h	Bestrahlungsstärke: $0.89 \text{ W}/(\text{m}^2\text{nm})$ bei 340 nm
B	Besprühung		0.5h	6-7l/min Keine Strahlung
Anzahl Zyklen			2/4/6/8/10	

Probleme bei der künstlichen Bewitterung

Durch die einseitige Behandlung der Probenbretter durch Wasser und Wärme, krümmten sich die Probenbretter. Diese Krümmung war so stark, dass der Deckel des Bewitterungsschranks so weit angehoben wurde, dass der Not-Aus-Schalter betätigt wurde und die Maschine sich selber abschaltete (Abbildung 16).



Abbildung 16: Krümmung der Probenbretter im Bewitterungsschrank Q-SUN 3100 Xenon Test Chamber der Firma Q-Panel LAB Products. Durch diese Krümmung hob sich der Deckel des Bewitterungsschranks ab und die Maschine schaltete sich aus.

Um die Krümmung der Probenbretter zu minimieren, wurden die Bretter in der Länge geteilt (Abbildung 17). Diese Teilung verkleinerte den Krümmungsradius soweit, dass der Deckel des Bewitterungsschranks sich wieder schloss und die Behandlung der Probenbretter fortgesetzt werden konnte.

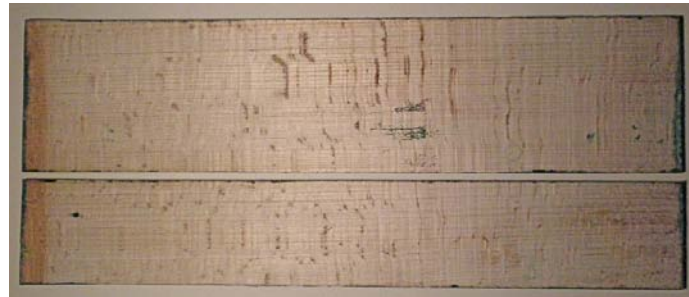


Abbildung 17: Teilung der Probenbretter der künstlichen Bewitterung, um die Krümmung zu verkleinern

Wechselklima

Die Probenbretter wurden nach unterschiedlichen Anzahlen von Wechselklimazyklen entnommen. Das Wechselklima erfolgte nach den Parametern der Tabelle 6. Die Proben der Entnahmeserie 0 waren keinem Wechselklima ausgesetzt und dienten als Referenzproben. Die weiteren Entnahmeserien waren 4, 8, 12, 16 und 20 Wechselklimazyklen ausgesetzt. Die Dauer der Zyklen waren also 8, 16, 24, 32 und 40 Tage.

Tabelle 6: Programm für das Wechselklima der Versuchsreihe Delaminierung.

Behandlung	Parameter	Grösse	Dauer
Normalklima	Temperatur relative Luftfeuchte	20°C 65%	bis zur Erreichung der Massenkonstanz
1. Klima	Temperatur relative Luftfeuchte	20°C 95%	96h
2. Klima	Temperatur relative Luftfeuchte	20°C 35%	96 h
Normalklima	Temperatur relative Luftfeuchte	20°C 65%	bis zur Erreichung der Massenkonstanz
Anzahl der Zyklen ¹		4/8/12/16/20	
1) Ein Zyklus besteht aus einem vollständigen Durchgang der Klimate 1-2			

Anschliessend an die Entnahme bei den jeweiligen Schnellalterungstests wurden die Probenbretter bei einem Klima von 20°C und 65% rLf. rückklimatisiert bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte. Nach dem Erreichen der Massenkonzanz wurden die Probenbretter mit zwei unterschiedlichen zerstörungsfreien Messmethoden auf mögliche Delaminierungen untersucht. Anschliessend wurden die Probenbretter zu Zugscherproben geschnitten. Sie wurden in der Universalprüfmaschine auf ihre Zugscherfestigkeit geprüft.

4.6.2.2 *Zerstörungsfreie Erkennung von Delaminierungen*

Durchschallung [25]

Durch die Erkenntnisse bei den Vorversuchen und damit man eine relativ gute Ortung von Delaminierungen mit Ultraschall erhält, wurde entschieden, die Messungen einer möglichen entstandenen Delaminierung bei den Probenbretter mit dem Ultraschallgerät Epoch XT der Firma Olympus (Abbildung 19) durchzuführen. Das Gerät hatte den Vorteil gegenüber dem Ultraschallgerät PCUS 10NF, welches bei den Vorversuchen eingesetzt wurde, dass es kleinere Messköpfe besitzt. Somit konnten die Messungen punktgenau dort vorgenommen werden, wo sich bei der Prüfung der Zugscherfestigkeit später auch die Bruchfläche befand. Anschliessend konnte somit eine Korrelation zwischen Zugscherfestigkeit und Laufzeitänderung für jede einzelne Zugscherprobe vorgenommen werden und nicht über ein gesamtes Probenbrett.



Abbildung 18: Schallgeschwindigkeitsmessgerät Epoch XT der Firma Olympus

Ultraschall kann vom menschlichen Gehör nicht wahrgenommen werden. Normalerweise liegt die Frequenz beim zerstörungsfreien Messen mit Ultraschall zwischen 100 kHz und 50 MHz. Bei der zerstörungsfreien Messung von Holz liegt die Messfrequenz häufig zwischen 16-50kHz. Im vorliegenden Fall hatten die verwendeten Longitudinalwellen eine Frequenz von 2.25 MHz. Longitudinalwellen schwingen in derselben Richtung, in der sie sich Ausbreiten (siehe Abbildung 19). Obwohl Ultraschallwellen den Wellen der hörbaren Töne stark ähneln, besitzen sie eine viel kürzere Wellenlänge. Dadurch können Reflexionen an sehr kleinen Oberflächen wahrgenommen werden, wie z.B. Flächen, die durch die Delaminierung des Klebstoffes entstanden sind. Diese Eigenschaft macht das Testen mit Ultraschall sehr nützlich für die zerstörungsfreie Analyse von Verklebungen.

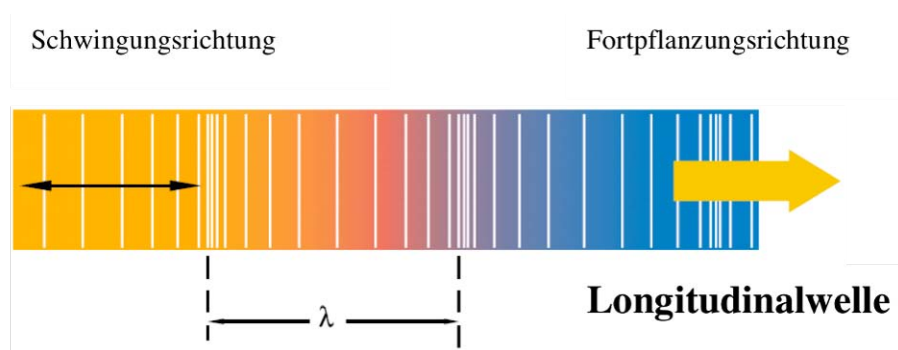


Abbildung 19: Schema der Longitudinalwelle nach Olympus [26]

Die Schalllaufzeit wird massgeblich durch den strukturellen Aufbau des Holzes beeinflusst. Laut NIEMZ [27] ist die Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung 3- bis 4-

mal grösser als senkrecht zur Faser. In tangentialer Richtung ist sie stets etwas kleiner als in radialer. Die Schalllaufzeit wird von den folgenden Parametern beeinflusst:

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

Mit dem Schallgeschwindigkeitsmessgerät Epoch XT wurde die Durchlaufzeit des Schalls durch die Probenbretter in tangentialer Richtung gemessen. Um die Longitudinalwellen zu senden und zu empfangen wurden zwei Paare von Messköpfen der Firma Panametrics verwendet. Sie hatten einen Durchmesser von 8.8mm und sendeten mit einer Frequenz von 2.25 MHz (Abbildung 20).



Abbildung 20: Spannvorrichtung für Sender-Empfängerschallköpfe.



Abbildung 21: Messköpfe für Logitudinalwellen der Firma Panametrics.

Sender und Empfänger, wurden an einer Spannvorrichtung (Abbildung 21) angebracht und aufeinander ausgerichtet. Damit jede Probe denselben Anpressdruck er-

fuhr wurde eine „Justier-Plexiglasplatte“ benutzt. Sie hatte eine Dicke von 8 mm. So konnten die Messköpfe ungedrückt, in einem konstanten Abstand voneinander platziert werden. Als Kopplungsmittel zwischen der Probe und den Prüfköpfen diente Ultragel II vom Hersteller Sonotech.

Eigenfrequenzmessungen [28]

Beim Eigenschwingversuch wurden die Probenbretter auf zwei Auflager gestellt (Abbildung 22). Bei den Auflagern handelt es sich um Streifen einer mitteldichten Faserplatte, die mit Hartschaumstreifen ummantelt mit Kunststoff an einer Schmalkante versehen waren. Diese wirken als Dämpfer zwischen Prob Brett und Auflager. Ein ähnliches Lager aus Hartschaum verwendete auch GÖRLACHER [29] in seinen Versuchen. Weiter wurde ein Taster an der Stelle mit der grössten Auslenkung angebracht. Mit einem Metallhammer wurden den Proben ein Impuls übertragen.



Abbildung 22: Versuchsaufbau Eigenfrequenzmessung

Die Position der Auflager sollte so festgelegt werden, dass die Probenbretter möglichst frei schwingen konnten. Dies bedeutet, dass man die Auflager bei einem Schwingungsknoten platzieren sollte. Die Schwingungsknoten entsprechen den Nullstellen der Differentialgleichung für die erste Biegeschwingung. Plottet man die Lösung der Differentialgleichung für die erste Biegeschwingung erhält man folgende Darstellung in der Abbildung 23.

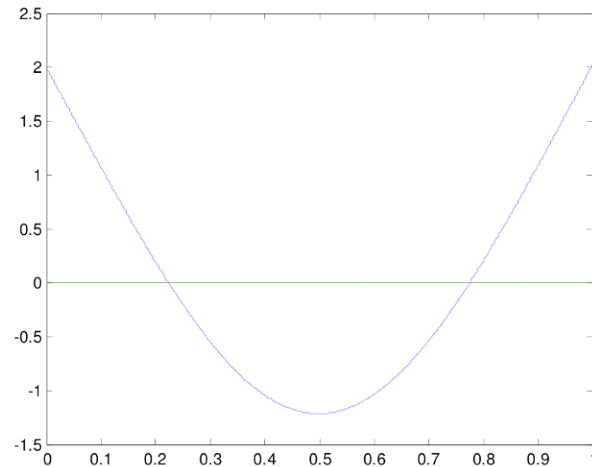


Abbildung 23: Lösung für die erste Biegeschwingung. In x-Richtung ist die Länge des Körpers, in y-Richtung die Auslenkung aufgetragen.

Gut zu erkennen sind die Nullstellen, welche den Schwingungsknoten entsprechen. Der Tiefpunkt entspricht einem Schwingungsbauch. So kommt es, dass die Auflager in einem Abstand von 0.2 der Länge des Probenbrettes angeordnet werden müssen, um ideale Voraussetzungen für die erste Biegeschwingung zu schaffen. Die Anregung erfolgt bei einem Schwingungsbauch. Dort wurde auch der Taster platziert. GÖRLACHER [29] Auch bei dieser Untersuchung verwendete man die Messkonstellation, welche in der Abbildung 24 zu sehen ist. Wählt man die Auflagerbedingungen günstig, stellen sich gut messbare Eigenschwingungen ein.

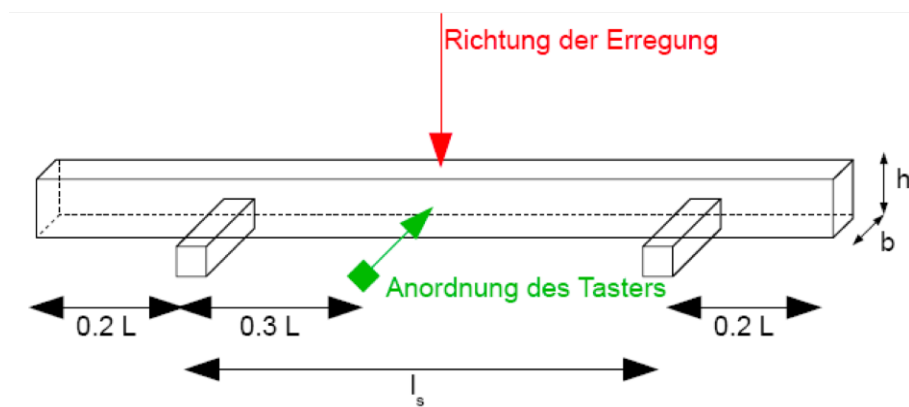


Abbildung 24: Konstellation nach Görlacher [29]

4.6.2.3 Ermittlung der Restfestigkeit [30]

Anschließend an die verschiedenen Alterungssimulationen und nach den Untersuchungen mit den zerstörungsfreien Messverfahren, zu Ortung von möglichen

Delaminierungen, wurden die Probenbretter auf ihre Restfestigkeit geprüft. Dazu wurden aus den Brettern je zehn Zugscherproben geschnitten. Wobei die Lage der Zugscherproben im Probenbrett wie folgt war: Die Zugscherproben mit den Nummern 1, 5, 6 und 10 lagen am Rand des Probenbrettes, die übrigen Zugscherproben, also 2, 3, 4, 7, 8 und 9, lagen im Innenbereich vom Probenbrett.

Die Herstellung der Proben wurde nach DIN EN 302-1 ausgeführt. Das verwendete Holz muss einen geraden Faserverlauf aufweisen, astfrei sein, der Jahrringwinkel α zwischen 30° und 90° liegen und die Holzfeuchte $12 \pm 1\%$ betragen. Die Probenbretter wurden auf eine Länge von 150 mm halbiert. Aus diesen Stücken wurden Streifen von 20 mm Breite geschnitten, welche auf jeder Seite je eine Nute erhielten. Diese Nuten reichten bis zur Klebfuge und durchtrennten diese. Der Abstand zwischen den beiden Nuten betrug 10 mm. Die Zugscherproben hatten somit eine Abmessung von $150 \times 20 \times 10$ mm und eine Bruchfläche von 200 mm^2 (Abbildung 25). Dabei wurde darauf geachtet, dass die Festigkeitswerte mit den jeweiligen Werten aus den Untersuchungen der Ultraschallmessung verglichen werden können.

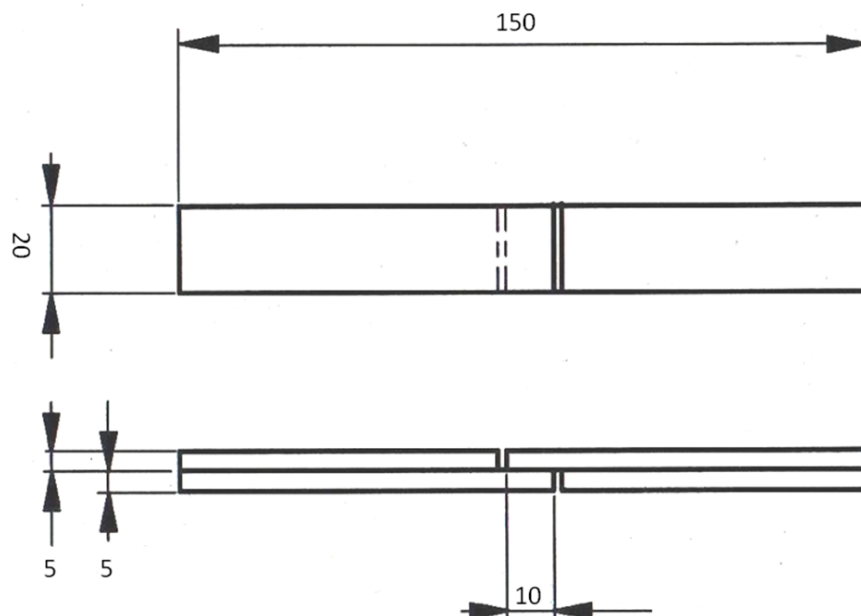


Abbildung 25: Zugscherproben nach der DIN EN 302-1. Alle Angaben in Millimeter.

Die Zugscherprüfung wurde mit der Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z010 (Abbildung 26) der Firma Zwick/Roell durchgeführt. Sie kann eine Kraft von maxi-

mal zehn Kilonewton als Druck- oder Zugbelastung aufbringen, was bei der vorliegenden Probengeometrie zu einer Zugscherbeanspruchung führte. Die Dehnungen wurden mithilfe eines induktiven Wegaufnehmers (Abbildung 27) gemessen, der ebenfalls von der Firma Zwick/Roell stammt. Dieser musste vor jeder Prüfung an der Probe festgeklebt werden.



Abbildung 26: Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z010.



Abbildung 27: Dehnungsaufnahme mittels induktivem Wegaufnehmer zur Bestimmung der Klebfugendehnung.

Die Zugscherprobe wurde zwischen die Spannbacken der Prüfmaschine geklemmt und mit dem Schraubenschlüssel angezogen. Durch diesen Vorgang wurde bereits ein Moment in die Probe eingebracht. Um keine Verfälschung der Resultate zu erhalten wurde vor dem Beginn des Prüfungsvorgangs der Kraftnullpunkt der Maschine angefahren. Nach Norm soll der Bruch der Zugscherprobe innerhalb von 90 ± 30 Sekunden erfolgen. Somit wurde einerseits ein ruckartiges ziehen verhindert und andererseits Krieeffekte in der Klebefuge vermieden. Als Prüfgeschwindigkeit wurde 0.45 mm/min eingestellt. Die Prüfung wurde automatisch gestoppt, sobald die Prüfmaschine einen Kraftabfall von 30% erreicht hatte. Anschliessend berechnete die Software testXpert der Firma Zwick/Roell die Scherfestigkeit (Formel 3) und die Dehnung (Formel 4) jeder Zugscherprobe.

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Formel 3

τ : Scherfestigkeit [N/mm²]
 F : Kraft [N]
 A : Fläche [mm²]

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0} \cdot 100\%$$

Formel 4

ε : Dehnung [%]
 L_0 : Anfangslänge [mm]
 L : Länge [mm]

Dabei ist zu beachten, dass bei den vorliegenden Versuchen als Ausgangslänge (L_0) die Klebfugenlänge zwischen den Nuten gewählt wurde, da man davon ausging, dass dieser Bereich fast ausschliesslich für die Gesamtdehnung verantwortlich war. Die erhaltene Dehnung ist, je nach Holzbruchanteil, somit eine Mischung zwischen Holz- und Klebstoffdehnung. Deshalb stimmen die erhaltenen Werte nicht mit den Literaturwerten von der reinen Dehnung des Holzes überein und können Werte von über 3% annehmen. Dasselbe gilt für die Scherfestigkeit.

Untersuchung der Spannungsentwicklungen mit zwei-dimensionaler Kreuzkorrelation (Vic 2D)

Für eine eingehendere Untersuchung der Spannungsentwicklungen an der Klebefuge wurden mit Hilfe einer zwei-dimensionalen Kreuzkorrelation Spannungsverteilungen aufgezeichnet. Das 2-D Kreuzkorrelations-System stammt von der Firma LIMES und besitzt den Namen Vic (Video image correlation). Dabei wird der Prüfvorgang mit einer hochauflösenden Kamera gefilmt (Abbildung 28). Durch das vorgängige Aufbringen eines Speckle-Musters kann die Auswertungssoftware Vic 2D bei der Nachbearbeitung einzelne Pixel identifizieren, ihre Verschiebung bestimmen und

damit die Dehnungsverteilung des betrachteten Ausschnitts berechnen. Die Zugscherprüfungen, die mit Vic 2D aufgenommen wurden, verliefen im gleichen Schema wie die mit dem induktiven Wegaufnehmer.



Abbildung 28: Kamera zur Aufzeichnung von Spannungsverteilungen bei Zugscherproben der Firma LIMES mit dem Objektiv AF NIKKOR 28-105mm, 1:3.5-4.5 D.

4.6.2.4 *Speckle-Muster*

Das Speckle-Muster wurde mittels Airbrush aufgebracht. Zunächst wurde eine Schmalseite der Zugscherprobe im Bereich der Bruchfläche mit weisser Farbe grundiert. Diese Grundierung hatte den Zweck, einen matten Hintergrund zu erhalten und in Kombination mit der schwarzen Farbe einen hohen Kontrast zu erzeugen. Wie schon erwähnt, wurde anschliessend mit schwarzer Farbe ein möglichst feines und zufällig angeordnetes Punktmuster aufgesprüht (Abbildung 29). Nur so kann bei der Auswertung sichergestellt werden, dass die Auswertungssoftware Vic 2D die einzelnen Punkte über die gesamte Dauer des Prüfungsvorgangs noch identifizieren kann.



Abbildung 29: Möglichst fein und zufällig angeordnetes Punktmuster für die Analyse der Spannungsverteilung auf der Schmalseite einer Zugscherprobe mit der Software Vic 2D der Firma LIMES.

4.7 **Ergänzende Versuche:** Erkennung von künstlich erzeugten Delaminierungen an Brettschichtholz

Bei den ergänzenden Untersuchungen ging es hauptsächlich darum, ob man Delaminierungen von Klebfugen auch bei realen Dimensionen und Geometrien orten kann. Dazu wurden BSH-Proben angefertigt und mit Stellen ohne Klebstoff in einzelnen Klebfugen versehen. Die Fehlverklebungsstellen dienten der Simulation von Delaminierungen in der Klebfuge. Man versuchte mittels drei verschiedener Ultraschallgeräte die Fehlstellen zu detektieren. Zusätzlich wurden exemplarisch Untersuchungen mit einer elektrischen Impedanzmessung und einer tomographischen Messung von Herrn Göcke, Firma Argus Electronic in Rostock, durchgeführt.

4.7.1 Material

Das untersuchte Probenmaterial wurde aus Fichte hergestellt. Das Material wurde sowohl vor der Bearbeitung als auch nach der Fertigstellung im Normalklima (20 °C/ 65 % rLf) konditioniert, auch die Messungen fanden in diesem Klima statt. Die fertigen Prüfkörper wiesen Abmessungen von 1000 x 160 x 210 mm auf. Sie bestehen aus je sieben Lamellen mit je 30mm Dicke. Es wurden drei Prüfkörper mit unterschiedlich definierten Fehlstellen untersucht, welche jeweils in der fünften Klebfuge von unten angeordnet waren (Abbildung 30). Die rot schraffiert dargestellten Fehlstellen wurden umlaufend von gefrästen Nuten (Breite = 15 mm, Tiefe = 1.5 mm) begrenzt und sollten ein Verdrücken des Klebstoffes verhindern.

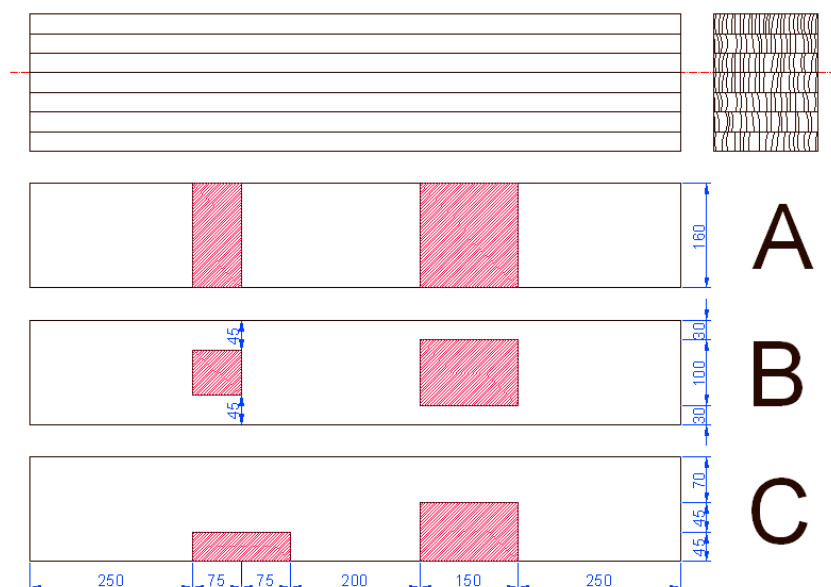


Abbildung 30: Aufbau der Ultraschall-Brettschichtholzbalken A, B, C

Alle Prüfkörper wiesen überwiegend stehende Jahrringe ($\alpha = 90^\circ \pm 15^\circ$) auf, d.h. die Durchschallung der Klebfuge erfolgte in tangentialer Richtung. Äste und Harzgallen wurden, sofern vorhanden, in Lage und Grösse erfasst, um die Interpretation der Messergebnisse zu erleichtern (Tabelle 29).

Als Klebstoff wurde PUR HB 181 verwendet. Technisch bedingt (aufgrund begrenzter Pressenhöhe) konnten die Prüfkörper nicht komplett maschinell verpresst werden. Jeweils 3 bzw. 4 Lamellen wurden maschinell verpresst und diese anschliessend mittels Schraubzwingen verklebt. Der Pressdruck in der Presse betrug 0.32 N/mm^2 , die Pressdauer 8.5 Stunden. Bei einseitigem Auftrag wurden 200 g/m^2 Klebstoff aufgetragen.

Um Einflüsse durch möglicherweise unterschiedliche Verklebungsparameter auszuschliessen, wurden die definierten Fehlstellen nicht in die manuell verpresste Klebfuge eingebracht.

Die Untersuchungen werden nach Abschluss der Ultraschall-Messungen durch den Projektpartner EMPA (Departement Informations-, Zuverlässigkeits- und Simulationstechnik; Abteilung Elektronik/Messtechnik/Zuverlässigkeit; Dr. Neuenschwander) durchgeführt. Die Messungen an der EMPA erfolgen durch Herrn Sanabria im Rahmen seiner Dissertation zu Ultraschall mit berührungsloser Ankopplung.

4.7.2 Methodik

4.7.2.1 Durchschallung

Die Untersuchungen wurde mit den Ultraschallgeräten Sylvatest Duo sowie USH durchgeführt. Dafür wurden die Prüfkörper zur Aufnahme der Sender bzw. Empfänger mit Bohrungen versehen. Durchmesser und Tiefe betrugen 5 und 10 mm (Sylvatest) bzw. 10 und 15 mm (USH).

Die Schalllaufzeiten bzw. Messsignale der untersuchten Prüfkörper wurden punktweise gemessen, die Anordnung der Messpunkte ist der Abbildung 31 zu entnehmen. Die Kreise stellen die jeweilige Lage von Sender bzw. Empfänger dar. Der Abstand der Messpunkte betrug 1.25, 2.5 bzw. 5.0 cm.

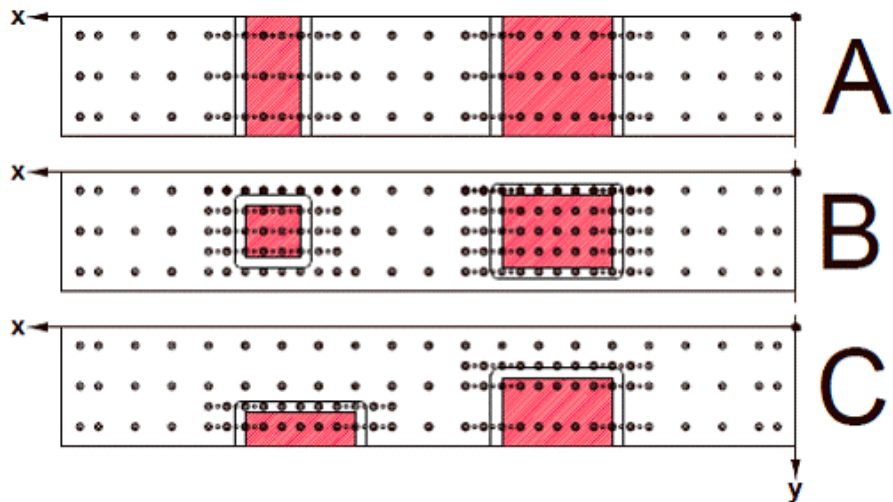


Abbildung 31: Abtastschemata der Prüfkörper-Varianten

Sylvatest Duo

Das Ultraschallgerät Sylvatest Duo von der Firma CBT Saint Sulpice arbeitet mit einer Prüffrequenz von 22 kHz. Je Messung wurden Schalllaufzeit und Amplitude fünfmal erfasst und anschliessend als Mittelwert ausgegeben. Es wurde mit den Einstellungen *Mode = Normal* und *Attenuator = None* gearbeitet.

Zur Gewährleistung eines konstanten Anpressdruckes bei den Messungen wurde das Sender/Empfänger-Paar in eine Einspannvorrichtung für die Prüfkörper integriert (Abbildung 32). Zur Entkopplung wurden die Prüfkörper während den Messungen auf Lagerhölzer sowie Polster aus geschäumter Polyethylen-Folie aufgelegt.

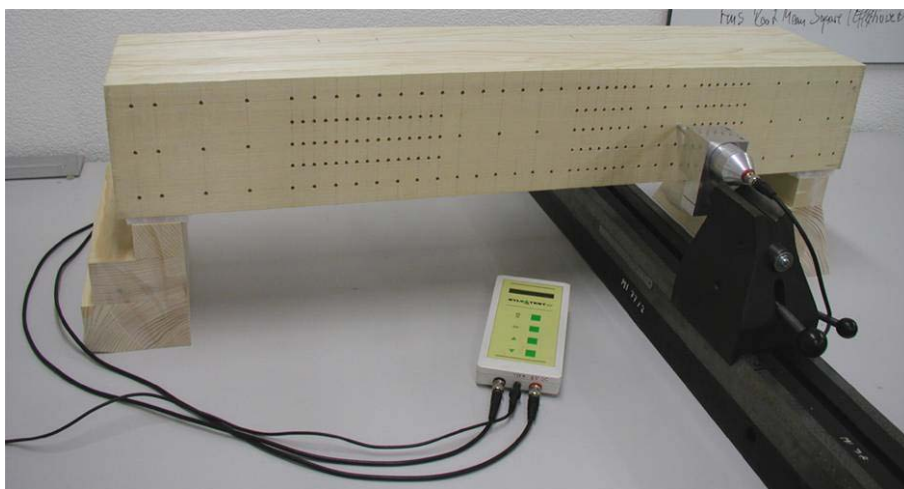


Abbildung 32: Versuchsaufbau Sylvatest Duo

Ultraschall Holz (USH)

Das Ultraschallmesssystem des Fraunhofer-Institutes für zerstörungsfreie Prüfverfahren Saarbrücken, EADQ Dresden, bestand aus einem Compact PCI- Rechner, der für diese messtechnische Applikation um ein DAQ-Board und ein spezielles Ultraschallmodul erweitert wurde. Das Sender/Empfänger-Paar mit jeweils integriertem Leistungsverstärker bestand aus einem Aktuator, welcher zur besseren Ankopplung ans Holz mit einem Gewinde versehen war, sowie einem Sensor, der in die vorgesehenen Bohrungen eingesteckt wurde. Neben der Schalllaufzeit wurden weitere Signalparameter wie Spitzenwert (Peak-to-Peak), Effektivwert (RMS), Schallgeschwindigkeit und Dämpfung erfasst. Sende- und Empfangssignale können visualisiert sowie als Kreuzkorrelation und FFT (Fast Fourier Transformation) dargestellt werden. Auch wenn ausschliesslich die Schalllaufzeit von Interesse war, wurden die Signale komplett gespeichert, um im Bedarfsfall darauf zurückgreifen zu können. Die USH-Messungen wurden mittels Transientenrecorder durchgeführt. Im Waveform-Generator wurde als Signalform eine Sinusschwingung gewählt. Die weiteren Einstellungen am Waveform-Generator waren: Hanning-Fenster = Ein, Offset = 0. Die Frequenz und die Anzahl der Perioden (Cycles) des Sendesignals wurde variiert. Die Messungen erfolgten mit folgenden Konfigurationen:

- Konfiguration 22/4 (22 kHz/4 Perioden)
- Konfiguration 22/10 (22 kHz/10 Perioden)
- Konfiguration 40/4 (40 kHz/4 Perioden)
- Konfiguration 40/10 (22 kHz/10 Perioden)

Die übrigen Einstellungen sind der Abbildung 75 zu entnehmen. Zur Entkopplung vom Untergrund wurden die Prüfkörper während den Messungen auf Polster aus geschäumter Polyethylen-Folie aufgelegt (Abbildung 33).

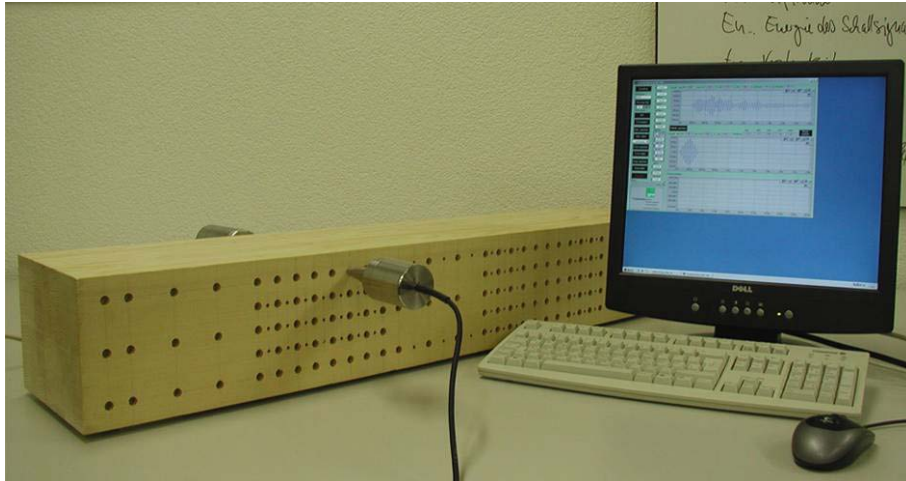


Abbildung 33: Versuchsaufbau USH

Wood pole Tester

Exemplarisch wurde von Herrn Göcke, Firma Argus Electronic in Rostock, Untersuchungen mit dem Ultraschallgerät „Wood pole Tester“ der japanischen Firma Fujikura durchgeführt. Die Durchschallungsfrequenz betrug dabei ca. 70 kHz und wurde in x-Richtung (siehe Abbildung 34) entlang zweier Messlinien in Abständen von 12 und 80mm in y-Richtung durchgeführt.

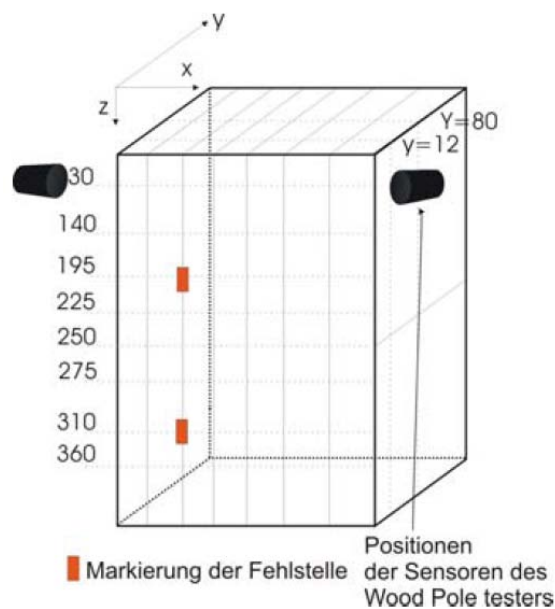


Abbildung 34: Messaufbau für „Wood pole Tester“ der japanischen Firma Fujikura. Messung in x Richtung. Alle Angaben sind in Millimeter

4.7.2.2 Tomographische Messungen mit PiCUS Hardware 2.0

Die tomographischen Messungen wurden von Herrn Göcke, Firma Argus Electronic in Rostock, vorgenommen. Dabei wurden die Messungen an den BSH-Proben mit dem System PiCUS Hardware 2.0 durchgeführt. Die Messhardware waren 12 PiCUS (2) Module, die an 24 Messpunkten angeschlossen waren. Als Koppelstifte dienten Schrauben, die etwa 3-4 mm tief eingeschraubt wurden. Der genaue Messaufbau ist in der Abbildung 35 ersichtlich. Die Datenqualität zeigte jedoch eine mittlere Güte an, da vermutlich die Sensoren etwas zu empfindlich für das kleine Messobjekt waren.

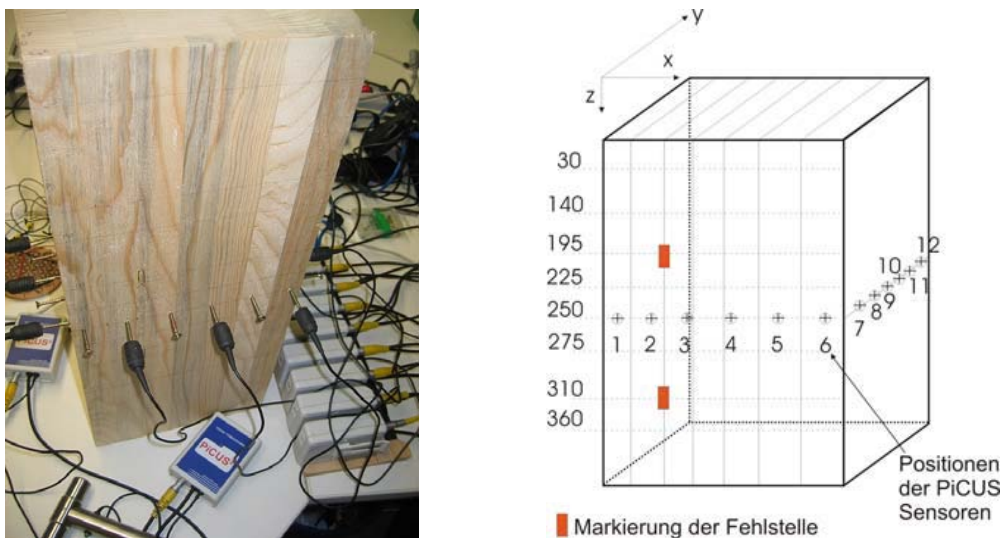


Abbildung 35: Messaufbau und Messschema für Messungen mit PiCUS Hardware 2.0

4.7.2.3 Elektrische Impedanzmessung

Dieses Messverfahren wird für die Untersuchung von Fäulnis an stehenden Bäumen angewendet und wurde von Herrn Göcke, Firma Argus Electronic in Rostock, durchgeführt. Die Messanordnung für Bäume zeigt die Skizze in Abbildung 36. Bei den Untersuchungen der Ortung von Verklebungsfehlstellen an BSH erfolgte die Strom-einspeisung (realisiert durch das Anlegen einer Spannung) an den Punkten A-B. An den Elektroden M-N wurde die abfallende Spannung gemessen. Der Abstand zwischen den Elektrodenpaaren A-B und M-N wurde dabei schrittweise erhöht. Jedoch wurde auf der Spannungsmesseite durch die Hochohmigkeit von Holz und Gerät über die Messkabel zu viele Störungen (Netzbrummen) eingefangen, was zu ungünstigen Messergebnissen führte.

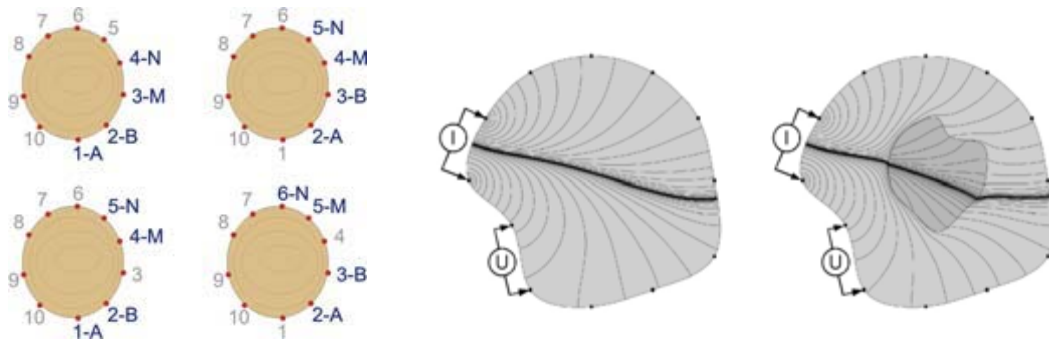


Abbildung 36: Messschema für eine elektrische Impedanzmessung mit dem Gerät TreeTronic Hardware an Bäumen

Bei einem weiteren Versuch wurde die Elektrodenanordnung noch etwas modifiziert. Man erhoffte sich daraus das starke Netzbrummen zu verringern. Dabei lagen die Spannungsmessenden Elektroden M-N zwischen den Stromeinspeiseelektroden A-B, also A, M, N, B.

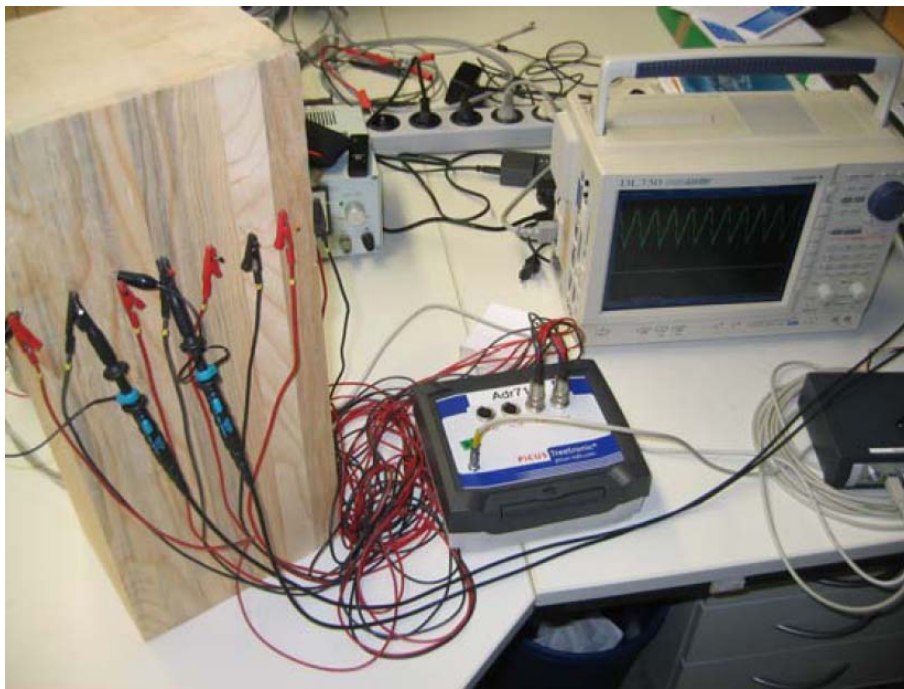


Abbildung 37: Messaufbau für eine elektrische Impedanzmessung mit dem Gerät TreeTronic.

5 Ergebnisse

5.1 Vorversuch:

Ermittlung der Verlässlichkeit von Ultraschall zur Detektierung von Fehlstellen in Klebfugen

Bei den visuellen Darstellungen der Versuchsergebnisse mittels MATLAB® R2008a ist zu beachten, dass die Laufzeiten zwischen den Messpunkten im Randbereich der Prüfkörper linear interpoliert wurden.

5.1.1 Zuverlässigkeit von Ultraschallmessungen mit PCUS 10NF an Fichtenbretter

Die charakteristischen Verläufe der einzelnen Prüfkörper-Varianten werden exemplarisch anhand der Abbildung 38 bis Abbildung 41 illustriert. Die restlichen Darstellungen der Schalllaufzeiten befinden sich im Anhang F. Die unregelmässigen schwarzen Linien in den Abbildungen stellen dabei den realen Verlauf der Klebfugen dar.

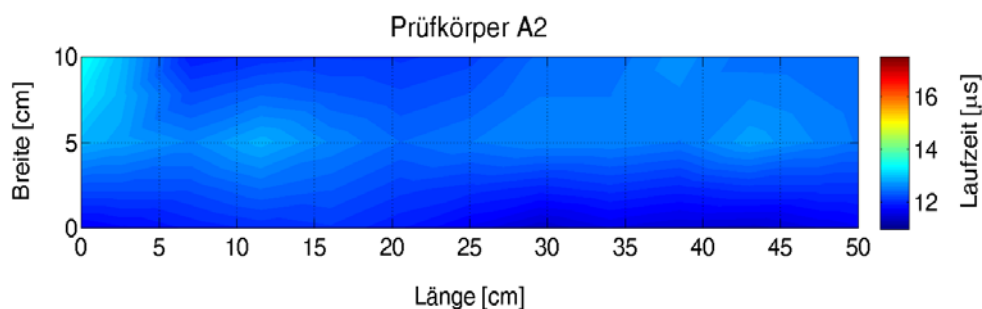


Abbildung 38: Schalllaufzeit Prüfkörper A2 bei 10 mm Dicke

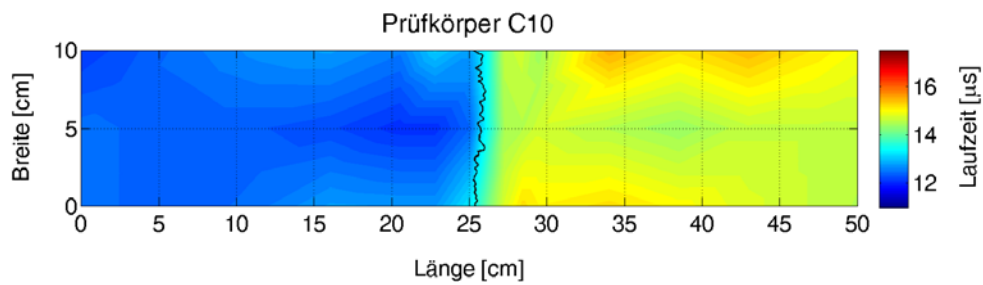


Abbildung 39: Schalllaufzeit Prüfkörper C10 bei 10 mm Dicke

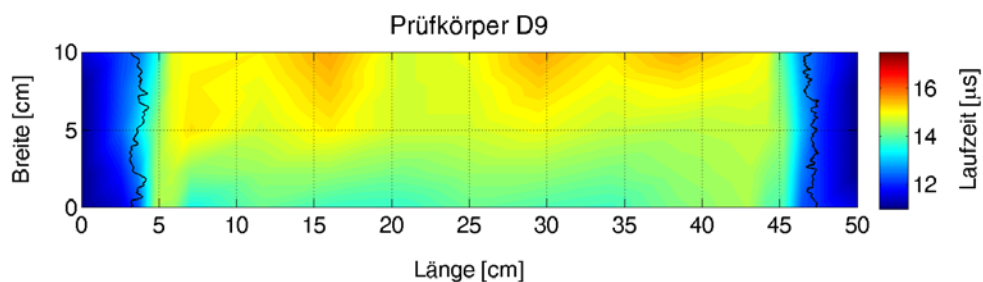


Abbildung 40: Schalllaufzeit Prüfkörper D9 bei 10 mm Dicke

Die Varianten A und B (Abbildung 38) wiesen mehr oder weniger konstante Schalllaufzeiten auf. Bei Variante C (Abbildung 39) wiesen die Laufzeiten bis zum Übergang von verklebtem und unverklebtem Bereich (etwa bei 25 cm) einen ähnlichen Verlauf auf. In der Übergangszone stieg die Laufzeit deutlich an und verlief danach auf einem erhöhten Niveau weiter. Analog dazu stellte sich Variante D (Abbildung 40) dar. In den verklebten Randbereichen stieg die Laufzeit innerhalb der Übergangszonen deutlich zum dazwischen liegenden, unverklebten Bereich mit weitgehend gleich bleibenden, längeren Laufzeiten an.

Innerhalb eines Prüfkörpers unterschieden sich die Schalllaufzeit bei vergleichbaren Bedingungen (verklebt oder unverklebt) um etwa 1 - 1.5 μs (im Extremfall 2 μs), d.h. bezogen auf den jeweiligen Absolutwert um rund 7.5 - 12.5 %. (15%)

Gegenüber verklebten Bereichen erhöhte sich bei unverklebten Abschnitten die Schalllaufzeit um ca. 2.5 - 3.5 μs , d.h. um rund 17 - 27 %.

Dagegen variierte die Schalllaufzeit zwischen den einzelnen Prüfkörpern gleicher bzw. verschiedener Varianten um 15 - 25 %.

Die Änderung des Schalllaufzeit-Niveaus beim Übergang der verschiedenen Bereiche (verklebt/unverklebt) vollzog sich in der Regel innerhalb von 2.5 - 3.5 cm, konnte jedoch auch bis zu 4.5 cm betragen.

Bei der exemplarischen Kombination zweier PK-Varianten (C7/D9) zeigte sich tendenziell der erwartete Überlagerungseffekt (Abbildung 41).

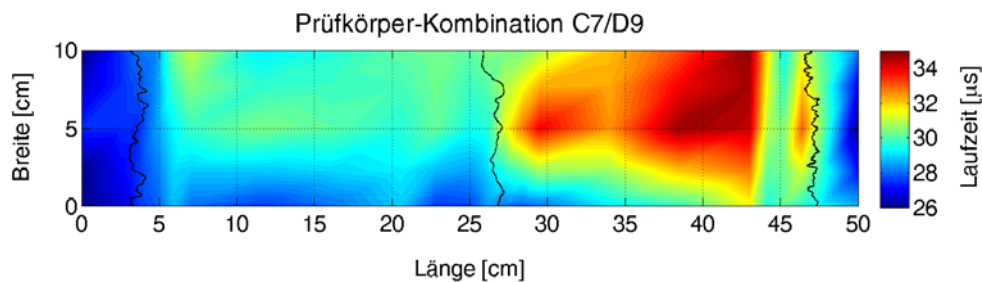


Abbildung 41: Schalllaufzeit Prüfkörper-Kombination C7/D9 bei 20 mm Dicke

Der Verlauf der Schalllaufzeit der Kombination setzte sich aus denen von PK C7 und D9 (Abbildung 92) zuzüglich etwa 2.5 - 3.5 μs für die Überwindung der zusätzlichen unverklebten Fuge zusammen. Der unplanmäßige Abfall der Schalllaufzeit zwischen Zentimeter 43 und 46 waren auf einen kleinen Fehler in der Oberfläche des PK D9 zurückzuführen. Im Bereich des lokalen Minimums (45.3 cm) befindet sich eine kleine "Beule". Diese führte dazu, dass die Oberflächen der PK dort eng zusammen lagen, während links und rechts davon eine schmale Fuge vorhanden war.

5.2 Hauptversuch: Untersuchung der Alterung an Klebfugen

5.2.1 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte des Buchenholzes betrug im Normalklima bei 20°C und 65% rLf. $\bar{X} = 11.4\%$, die der Fichte $\bar{X} = 11.6\%$. Dabei hatte die Holzfeuchte der Buche eine Standardabweichung von $s_x = 0.98\%$ und die der Fichte eine von $s_x = 0.49\%$. Dies ergab $v = 8\%$ bei der Buche, bzw. 4% bei der Fichte. Insgesamt wurden bei der Buche $n = 248$ Proben geprüft und bei der Fichte $n = 200$ Proben.

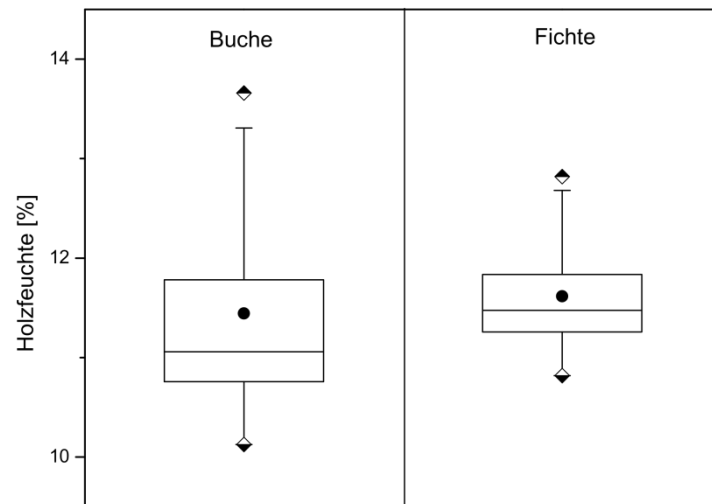


Abbildung 42: Holzfeuchte der verwendeten zwei Holzarten Buche und Fichte.

5.2.2 Dichte

Die Dichte wurde im Normalklima (20°C / 65% rLf.) ermittelt. Insgesamt wurden bei der Buche $n=482$ Proben bestimmt und bei der Fichte $n = 475$ Proben. Das Buchenholz hatte eine durchschnittliche Dichte von $\bar{X} = 0.68 \text{ g/cm}^3$ und das Fichtenholz eine von $\bar{X} = 0.5 \text{ g/cm}^3$. Dabei hatte die Buche $s_x = 0.024 \text{ g/cm}^3$ und die Fichte $s_x = 0.048 \text{ g/cm}^3$. Daraus liess sich ein $v = 3.5\%$ bei Buche und $v = 9.5\%$ bei Fichte ermitteln.

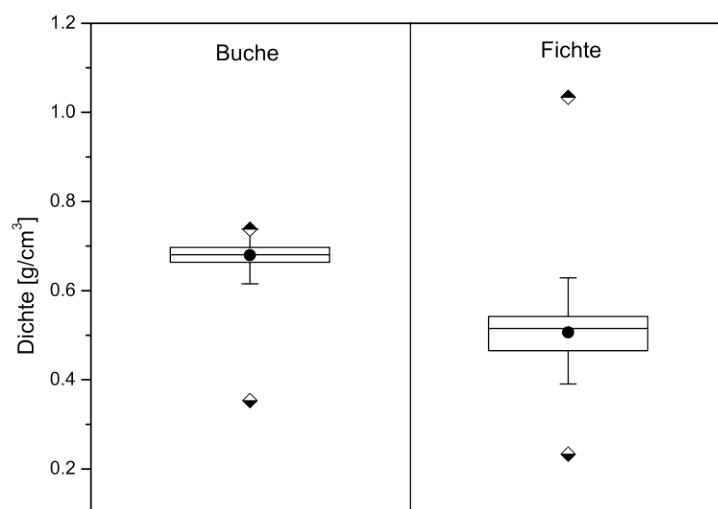


Abbildung 43: Dichte bei Normalklima (20°C/65% rLF) der verwendeten zwei Holzarten Buche und Fichte.

5.2.3 Zerstörungsfreie Erkennung von Delaminierungen

Die zerstörungsfreie Erkennung der möglichen Delaminierungen in den Klebfugen nach einer Schnellalterung wurde mittels zweier Messmethoden durchgeführt. Nach der Behandlung mit den drei verschiedenen Schnellalterungstests (Kapitel 4.6.2.1) wurden die Probenbretter solange im Normalklima eingelagert bis sie ihre Massenkonzanz erreicht hatten. Anschliessend wurden sie einer Durchschallung und einer Eigenfrequenzmessung unterzogen (siehe dazu Kapitel 4.6.2.2). Bei der Durchschallung wurden pro Brett zehn Messungen vorgenommen. Diese befanden sich an der gleichen Stelle wie die Bruchflächen der anschliessenden Prüfung der Restfestigkeit. Bei den Eigenfrequenzmessungen wurde pro Brett je eine Messung durchgeführt. Durch das Auftrennen der Probenbretter nach der künstlichen Bewitterung, konnten diese nicht mehr der zweiten Eigenfrequenzmessung nach der Behandlung unterzogen werden (Kapitel 4.6.2.1) und somit nicht mehr in der Auswertungen berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Erkennung von Delaminierungen in der Klebfuge sind nach den verschiedenen Schnellalterungstests unterteilt. Auf der y-Achse sind die jeweiligen Änderungen der Schalllaufzeit oder der Eigenfrequenz aufgetragen und auf der x-Achse die Behandlungsdauer. Bei den unterschiedlichen Farben der Graphen handelt es sich um die drei verschiedenen Klebstofftypen und die Referenzprobe aus Vollholz. Die Probennummerierung wurde wie folgt durchgeführt: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH). Die durchgezogene Linie stellt die Ergebnisse der Buchenproben (BU) und die gestrichelte Linie diejenigen der Fichtenproben (FI) dar.

5.2.3.1 Laufzeitänderung bei Durchschallung

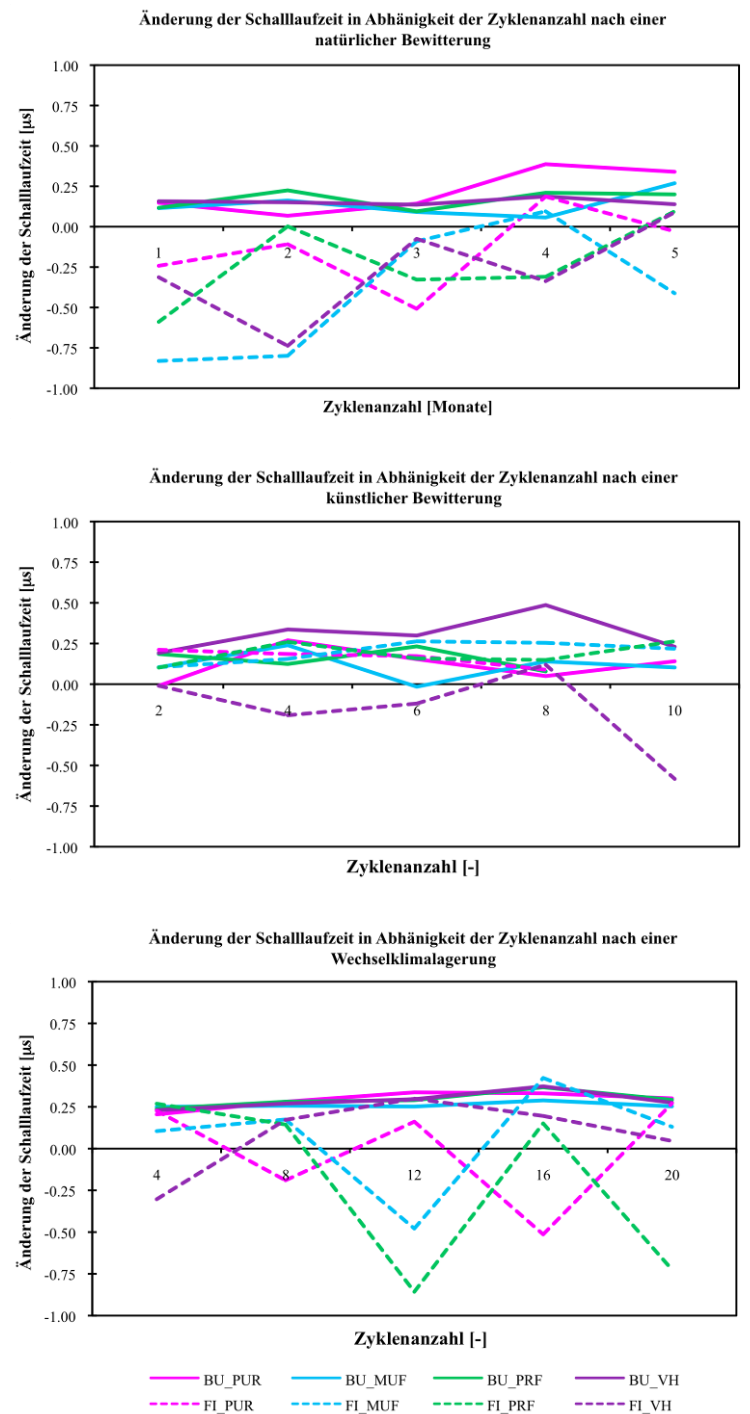


Abbildung 44: Verlauf der Änderung der Schalllaufzeit mit Zunahme der Zyklenzahl. Dabei wurden die Probenbretter vor den jeweiligen Schnellalterungstest und nach der Behandlung gemessen und die Laufzeitänderungen auf der y-Achse der Diagramme aufgetragen.

Abkürzungen: Buche (BU), Fichte (FI); Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH)

Bei der Messung der Schalllaufzeitänderung vor und nach der Behandlung mit den verschiedenen Schnellalterungstests, waren sehr hohe Schwankungen der Messwerte erkennbar. Die Buchenproben besaßen eine durchschnittliche Standardabweichungen von $s_x = 0.34 \mu\text{s}$ und die Fichtenproben eine von $s_x = 0.87 \mu\text{s}$. Bezogen auf die durchschnittliche Zunahme der Schalllaufzeitänderung bei einigen Proben von $0.2 \mu\text{s}$ nach einer Schnellalterung, gehen diese Werte in den Streuungen der Messung unter. Somit ist ersichtlich, dass aus den erhaltenen Ergebnissen der Untersuchungen keine wirklichen Trends ermittelt werden konnten. In den nachfolgenden Abschnitten wird aber trotzdem versucht, einzelne Trends aus den verschiedenen Schnellalterungstests heraus zu filtern.

Bei den Probenbretter, die einer natürlichen Bewitterung unterzogen wurden, ergab sich im Durchschnitt eine Änderung der Schalllaufzeit von $\bar{X} = 0.2 \mu\text{s}$ bei der Buche und Fichte. Werden lineare Trendlinien über die erhaltenen Graphen in der Abbildung 44 gelegt, welche der übersichtshalber weggelassen wurden, zeigten sich bei den Buchenproben Anstiege von durchschnittlich $0.1 \mu\text{s}$ mit der Zunahme der Anzahl Behandlungsmonate. Bei der Fichte waren diese Anstiege noch deutlicher erkennbar und betrugen $0.5 \mu\text{s}$.

Bei den Proben der künstlichen Bewitterung waren bei beiden Holzarten eine konstante Zunahme von $\bar{X} = 0.2 \mu\text{s}$ zu erkennen. Jedoch wurde kein Anstieg oder Abfall der Trendlinien mit der Zunahme der Zyklenanzahl festgestellt.

Nach einer Wechselklimalagerung der Bretter zeigten die Buchenproben eine durchschnittliche Änderungen der Schalllaufzeiten von $\bar{X} = 0.2 \mu\text{s}$ mit einem konstanten Verlauf der linearen Trendlinien bei der Zunahme der Zyklenanzahl. Bei den Fichtenbrette konnte man nach der Behandlung keine klaren Aussagen über die Zunahme oder Abnahme der Schalllaufzeit geben, sowie über den Anstieg oder Abfall der Trendlinien machen. Die Streuung der einzelnen Messwerte war zu gross.

Detailliertere Angaben zu den Ergebnissen der Schalllaufzeitänderung befinden sich im Anhang A.

5.2.3.2 Einfluss der Eigenfrequenz

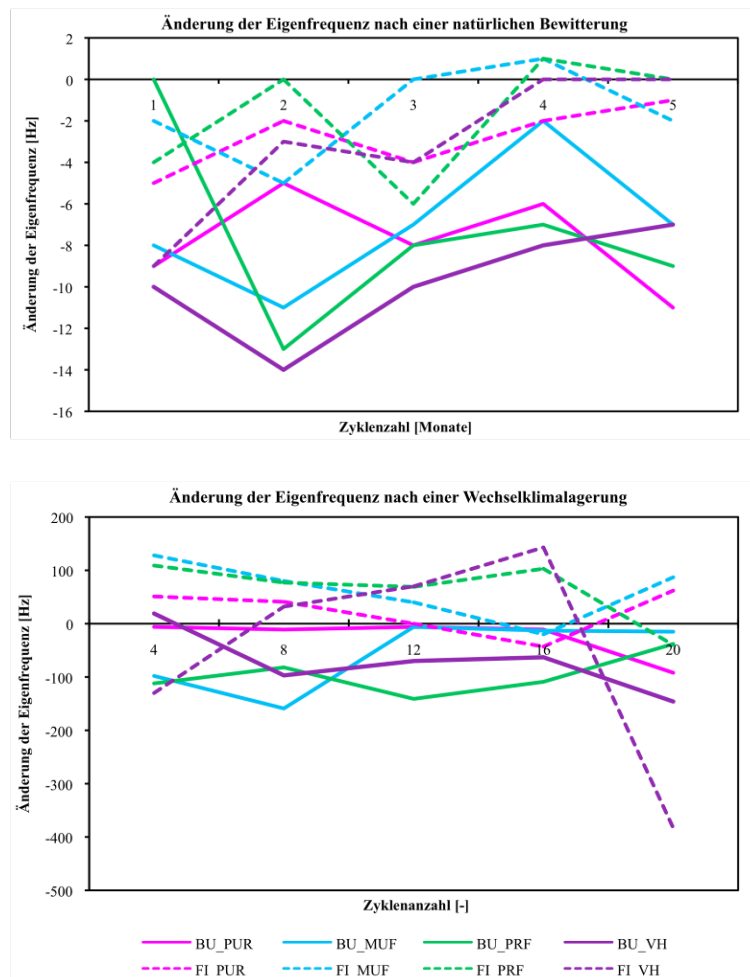


Abbildung 45: Ergebnisse der Eigenfrequenzmessung nach der Schnellalterung der Klebfuge. Dabei würde eine Messung der Eigenfrequenz vor und eine nach der Behandlung mit den Schnellalterungstest vorgenommen und die Änderung Hertzzahl in den Diagrammen abgebildet.

Abkürzungen: Buche (BU), Fichte (FI); Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH)

Bei den Untersuchungen der Eigenfrequenzänderung wurde pro Probenbrett vor und nach der Behandlung mit den verschiedenen Schnellalterungstests je eine Messung durchgeführt. Auch hier, wie beim Durchschallungsversuch schon, zeigten sich sehr hohe Schwankungen der Messwerte. Deshalb analysierte man nur die Werte bei den einzelnen Schnellalterungstests. Zusätzlich zu erwähnen ist, dass die Auswertung der Probenbretter nach einer künstlichen Bewitterung nicht mehr möglich war. Durch die einseitige Behandlung der Probenbretter durch Wasser und Wärme, krümmten sich die Probenbretter. Um die Krümmung der Probenbretter zu minimieren, wurden die

Bretter in der Länge aufgetrennt und ergaben durch die geänderte Probengeometrie stark unterschiedliche Eigenfrequenzen (siehe Kapitel 4.6.2.1.).

Bei den Probenbrettern, die einer natürlichen Bewitterung unterzogen waren, ergaben sich im Durchschnitt Änderungen der Eigenfrequenz von $\bar{x} = -8$ Hz bei der Buche und $\bar{x} = -2.6$ Hz bei der Fichte. Die Spannweiten der einzelnen Werte waren bei der Buche von -14 bis 0 Hz und bei der Fichte von -9 bis 1 Hz. Werden lineare Trendlinien über die erhaltenen Graphen in der Abbildung 45 gelegt, welche übersichtshalber weggelassen wurden, ergab sich bei der Buche kein klarer Trend mit Zunahme der Anzahl Behandlungsmonate. Bei der Fichte gab es einen Anstieg von 4 Hz mit der Zunahme der Behandlungsmonate.

Nach einer Wechselklimalagerung der Bretter ergaben die Messdaten höhere Werte als bei der Eigenfrequenzmessung der natürlich bewitterten Proben. Es wurde eine durchschnittliche Eigenfrequenzänderung von $\bar{x} = -62.8$ Hz bei der Buche und $\bar{x} = -4$ Hz bei der Fichte gemessen. Die Spannweiten der einzelnen Werte waren dabei bei der Buche von -159 bis 19 Hz und bei der Fichte von -24 bis 74 Hz. Bei den Buchenbrettern konnte man nach der Behandlung keine klare Aussage über den Anstieg oder Abfall der Trendlinien machen. Bei den Fichtenproben wurde ein Anstieg von 150 Hz mit Zunahme der Zyklenanzahl festgestellt. Jedoch sind die Werte mit Vorsicht zu betrachten, da die einzelnen Messwerte eine sehr grosse Streuung aufwiesen.

Detailliertere Angaben zu den Ergebnissen der Schalllaufzeitänderung befinden sich im Anhang B.

5.2.4 Ermittlung der Restfestigkeit

Die Restfestigkeit der Klebfuge nach den verschiedenen Schnellalterungstests wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches nach der DIN EN 302-1 ermittelt. Die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Boxplots zeigen die Zugscherfestigkeiten in Abhängigkeit der jeweiligen Behandlungsdauer. Zusätzlich wurden in den Diagrammen die Medianwerte eingetragen und mit Trendlinien versehen, um den Verlauf der Restfestigkeit über die Behandlungszeit besser zu erkennen. Weitere Ergebnisse, wie die Dehnung oder den Holzbruchanteil sind im Anhang C aufgeführt.

Die Diagramme sind je in zwei Hälften unterteilt. In der linken Hälfte sind alle Zugscherproben aus Buche und in der rechten Hälfte diejenigen aus Fichtenholz. Auf der y-Achse sind die Scherfestigkeiten in N/mm^2 aufgetragen und auf der x-Achse die unterschiedlichen Probenbretter, aus denen die Proben hergestellt wurden. Dabei setzte sich die Probenbezeichnung wie folgt zusammen. Die erste Stelle in der Nummerierung bezeichnet den Schnellalterungstest mit natürliche Bewitterung (N), künstliche Bewitterung (K) und Wechselklimalagerung (W). In der zweiten Stelle sind die verwendeten Klebstoffe bezeichnet. Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH). An der dritten Stelle sind die Holzarten aufgeführt mit Buche (BU) und Fichte (FI). An der vierten und letzten Stelle ist die Behandlungsdauer oder Zyklenzahl aufgelistet.

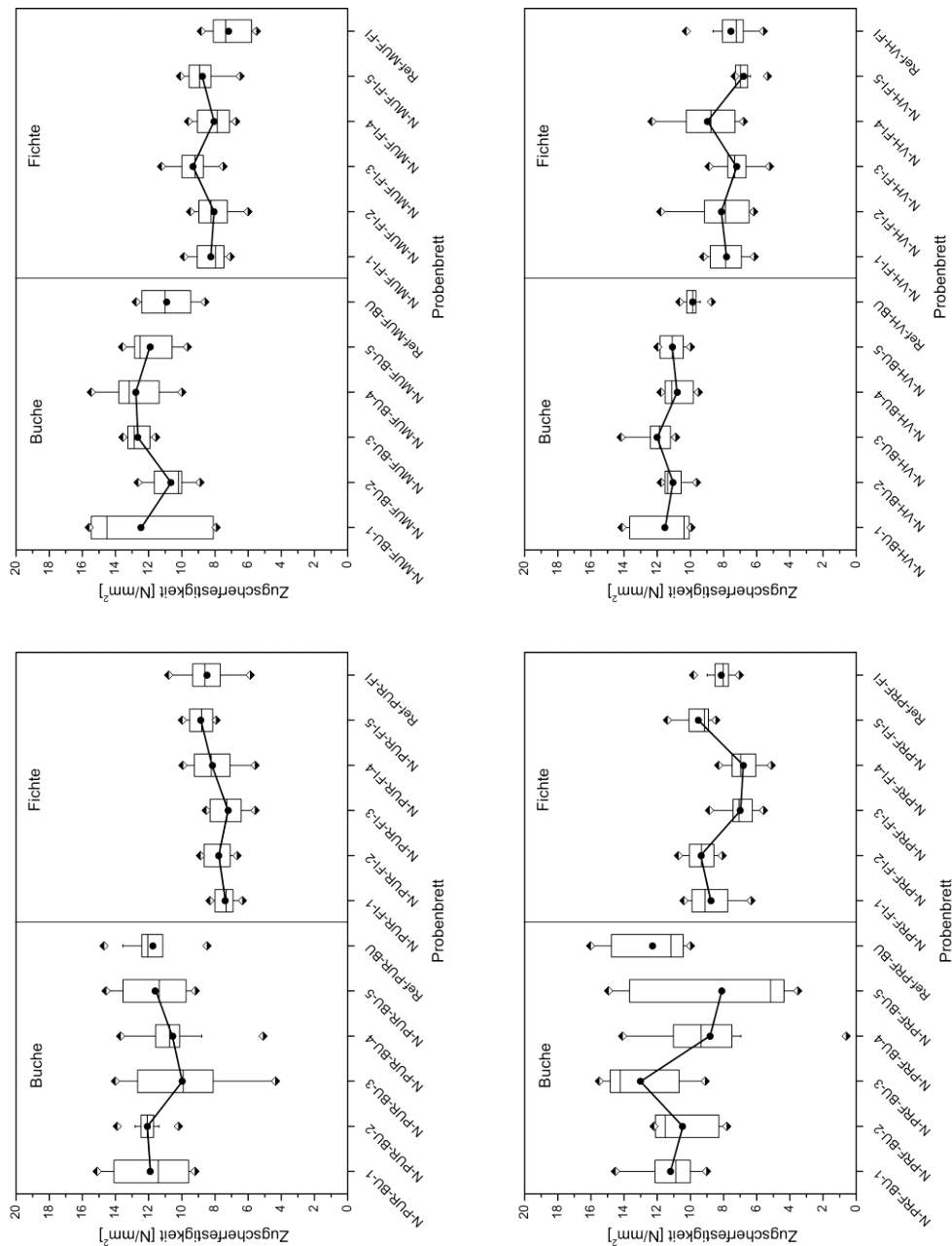


Abbildung 46: Boxplot der Restfestigkeit nach einer natürlichen Bewitterung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Monaten.

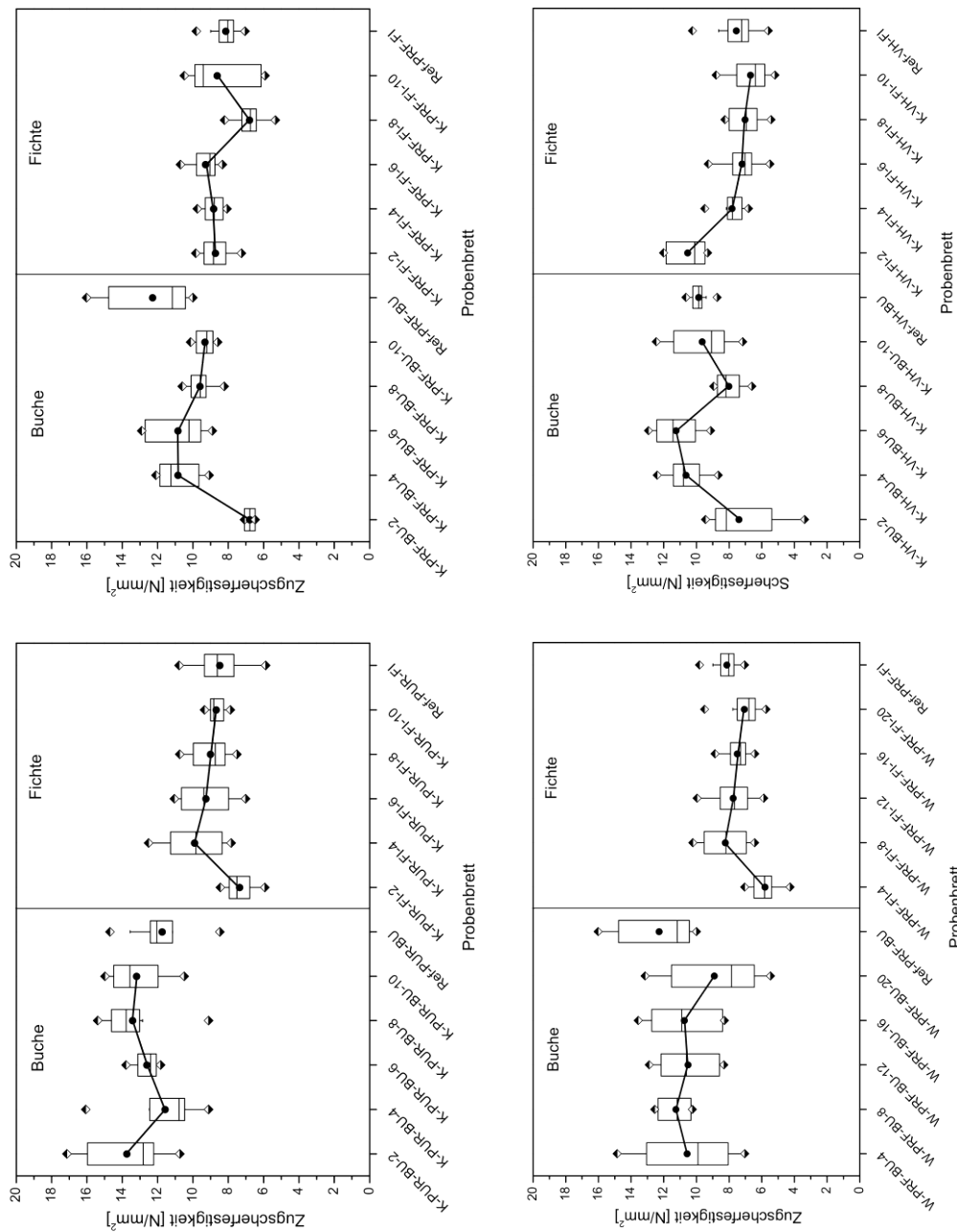


Abbildung 47: Boxplot der Restfestigkeit nach einer künstlichen Bewitterung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: künstliche Bewitterung (K); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Anzahl Zyklen.

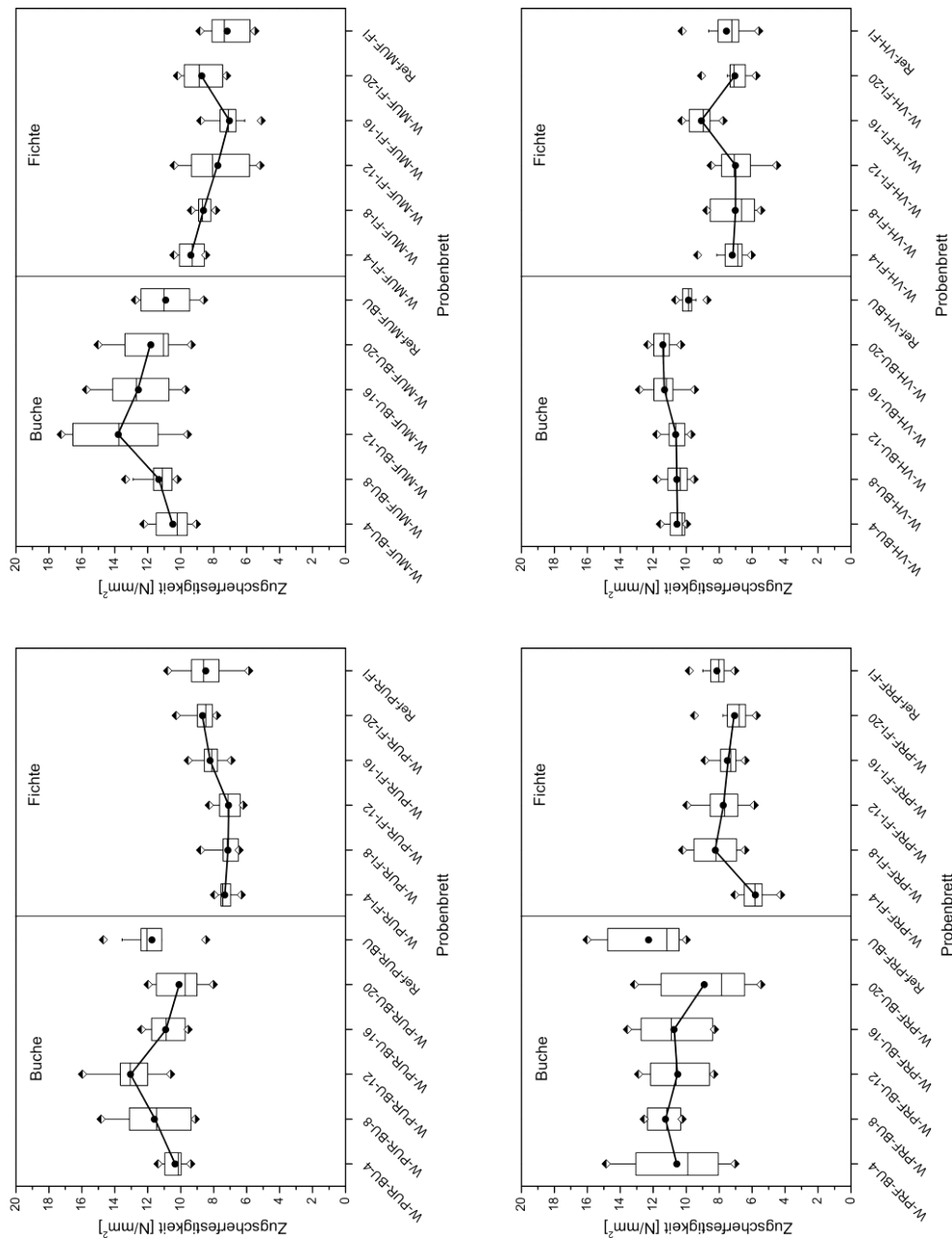


Abbildung 48: Boxplot der Restfestigkeit nach einer Wechselklimalagerung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: Wechselklimalagerung (W); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Anzahl Zyklen.

5.2.4.1 Holzbruchanteil

Die Holzbruchanteile (siehe Anhang C) betrugen bei den Zugscherproben aus Buche $\bar{X} = 91\%$ ($s_x = 25.31\%$; $v = 27\%$) und bei denen aus Fichte $\bar{X} = 99\%$ ($s_x = 2.66\%$; $v = 2\%$), dies gemittelt über den gesamten Zugscherversuch. Dieser fast 100%ige Holzbruchanteil zeigt, dass die verwendeten Klebstoffe eine höhere Zugscherfestigkeit aufweisen als die Holzarten, die bei den Prüfungen verwendet wurden.

5.2.4.2 Zugscherfestigkeit

Es wurden über den gesamten Zugscherversuch die Mittelwerte gebildet, also über alle Klebstoffe, Schnellalterungstests und Zykluszahlen. Dies ergab einen Mittelwert von $\bar{X} = 11.2 \text{ N/mm}^2$ bei der Buche und $\bar{X} = 8 \text{ N/mm}^2$ bei der Fichte. Wobei hier noch auf die grosse Streuung hingewiesen ist. Sie betrug bei der Buche mit $s_x = 5.45 \text{ N/mm}^2$ ($v = 49\%$) und bei der Fichte $s_x = 3.88 \text{ N/mm}^2$ ($v = 49\%$).

Werden nur die Ergebnisse des Schnellalterungstests der natürlichen Bewitterung (Abbildung 46) betrachtet, ergaben sich Mittelwerte bei den verklebten Buchenproben von $\bar{X} = 11.1 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 2.77 \text{ N/mm}^2$; $v = 25\%$) und bei den Fichtenproben von $\bar{X} = 8.1 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.38 \text{ N/mm}^2$; $v = 17\%$). Bei den Vollholzproben, die den genau gleichen Zyklusanzahlen ausgesetzt waren wie die verklebten Zugscherproben, sahen die Werte ähnlich aus. Dabei erhielt man $\bar{X} = 11.3 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.19 \text{ N/mm}^2$; $v = 11\%$) bei der Buche, bzw. $\bar{X} = 7.8 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.55 \text{ N/mm}^2$; $v = 20\%$) bei der Fichte. Bei den Referenzproben, also diejenigen Zugscherproben, die keinem Schnellalterungstest unterzogen waren, ergaben sich Mittelwerte bei der Buche von $\bar{X} = 11.19 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.87 \text{ N/mm}^2$; $v = 17\%$) und bei der Fichte von $\bar{X} = 7.83 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.25 \text{ N/mm}^2$; $v = 16\%$).

Vergleicht man die Zugscherfestigkeiten nach der Schnellalterung mit der künstlichen Bewitterung (Abbildung 47), ergaben sich Mittelwerte bei den verklebten Buchenproben von $\bar{X} = 11.1 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 2.47 \text{ N/mm}^2$; $v = 22\%$) und bei den Fichtenproben von $\bar{X} = 8.4 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.64 \text{ N/mm}^2$; $v = 20\%$). Bei den Vollholzproben erhielt man Mittelwerte von $\bar{X} = 11.3 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 0.49 \text{ N/mm}^2$; $v = 4\%$) bei der Buche, bzw. $\bar{X} = 7.8 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 0.85 \text{ N/mm}^2$; $v = 11\%$) bei der Fichte. Bei den Referenzproben erhielt man Mittelwerte bei der Buche von $\bar{X} = 11.19 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.87 \text{ N/mm}^2$; $v = 17\%$) und bei der Fichte von $\bar{X} = 7.83 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.25 \text{ N/mm}^2$; $v = 16\%$).

Betrachtet man die Ergebnisse der Wechselklimalagerung (Abbildung 48), ergaben sich Mittelwerte bei den verklebten Buchenproben von $\bar{X} = 11,1 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1,95 \text{ N/mm}^2$; $v = 18\%$) und bei der Fichte von $\bar{X} = 7,7 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1,39 \text{ N/mm}^2$; $v = 18\%$). Bei den Buchen-Vollholzproben erhielt man Mittelwerte von $\bar{X} = 10,9 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 0,81 \text{ N/mm}^2$; $v = 7\%$), bzw. $\bar{X} = 7,5 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1,32 \text{ N/mm}^2$; $v = 18\%$) bei der Fichte. Bei den Referenzproben, also diejenigen Zugscherproben, die keinem Schnellalterungstest unterzogen waren, ergaben sich Mittelwerte bei der Buche von $\bar{X} = 11,2 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1,87 \text{ N/mm}^2$; $v = 17\%$) und bei der Fichte von $\bar{X} = 7,8 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1,25 \text{ N/mm}^2$; $v = 16\%$).

Betrachtet man die eingezeichneten Verläufe der Mediane, war es auch hier schwierig einen Trends herauslesen zu können. Es kann nicht eine eindeutige Aussage über eine Zu- oder Abnahme der Zugscherfestigkeit mit einer Erhöhung der Behandlungsdauer gemacht werden. Dies kann anhand des Klebstoffes MUF nach einer Wechselklimalagerung (Abbildung 48) aufgezeigt werden. Das Maximum der Zugscherfestigkeit lag bei den Buchenproben bei der mittleren Zyklenzahl 12. Bei der Fichtenproben war es umgekehrt. Dort befand sich das Minimum bei der mittleren Zyklenzahl 16.

5.2.4.3 Exemplarische Darstellung einiger ausgewählter Spannungsentwicklungen mit zwei-dimensionalen Kreuzkorrelation (Vic 2D)

Bei den Ergebnissen der Restfestigkeit im Kapitel 5.2.4.2 wurde erkannt, dass mit den angewendeten Schnellalterungstests keine Delaminierung der Klebfuge erreicht werden konnte. Somit wurde entschieden, nur an ausgewählten Zugscherproben die Spannungsentwicklung mit Hilfe des Vic 2D-Systems (Video image correlation) zu untersuchen.

Dazu wurden Prüfkörper nach der Wechselklimalagerung ausgewählt. Es wurden Zugscherproben aus Buche, die mit dem Klebstoff MUF verklebt waren, ausgewählt. Pro Zyklenzahl wurden je zwei Zugscherproben untersucht. Dabei handelt es sich um Zugscherproben mit der Probennummer 1 aus der Randzone des Probenbrettes (linke Bildserie) und der Probennummer 3 aus der Mitte des Probenbrettes (rechte Bildserie).

Um die Verschiebung des Materials in einer belasteten Zugscherprobe besser darzustellen, wurden die Verschiebungen mit sogenannten Falschfarbenbildern sichtbar gemacht. In den Falschfarbenbildern in den Abbildung 49 bis Abbildung 53 sind die Spannungszustände kurz vor dem Bruch der Zugscherprobe abgebildet. Zu beachten ist noch, dass die Skalierung der Falschfarbenbilder nicht immer die gleiche ist.

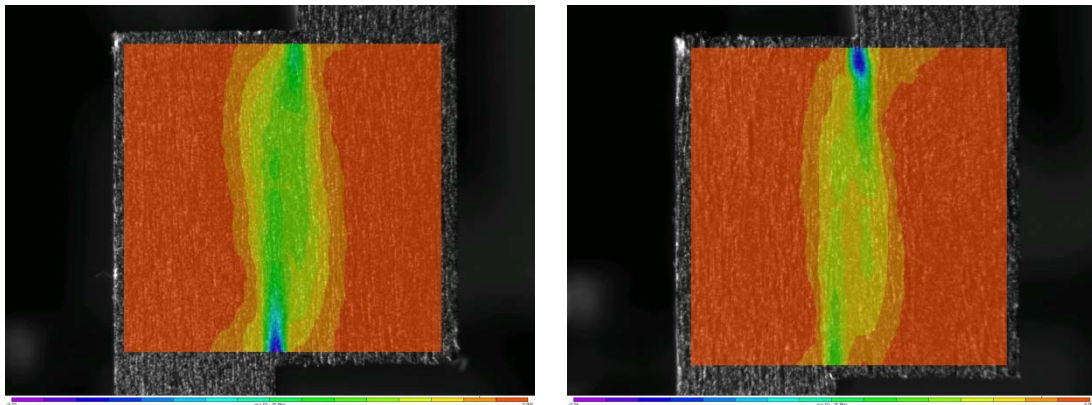


Abbildung 49: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz, verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem ersten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.

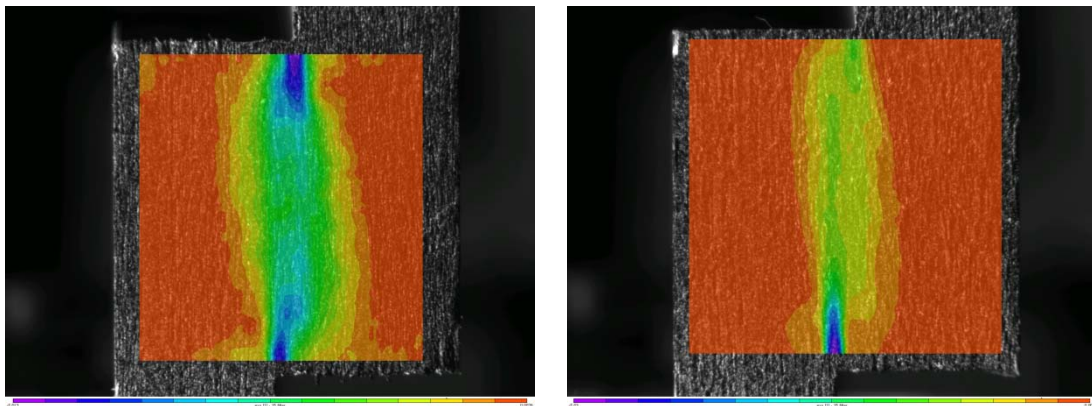


Abbildung 50: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz, verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem zweiten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.

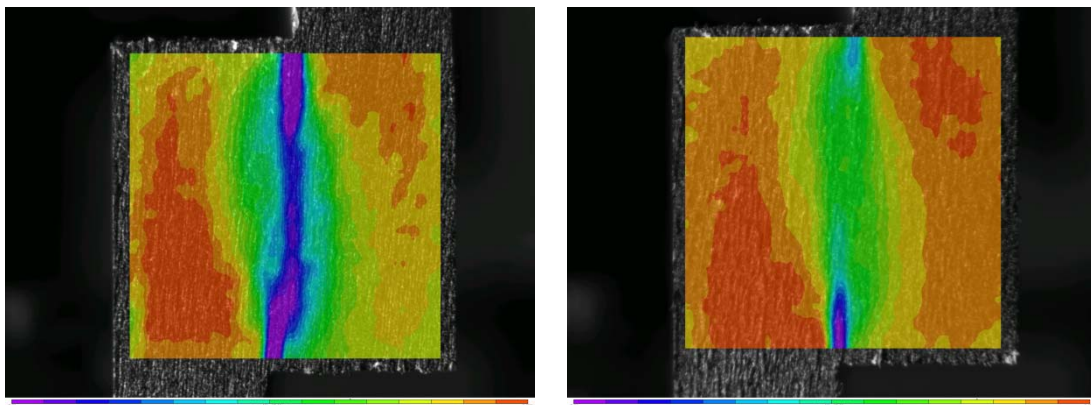


Abbildung 51: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz, verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem dritten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.

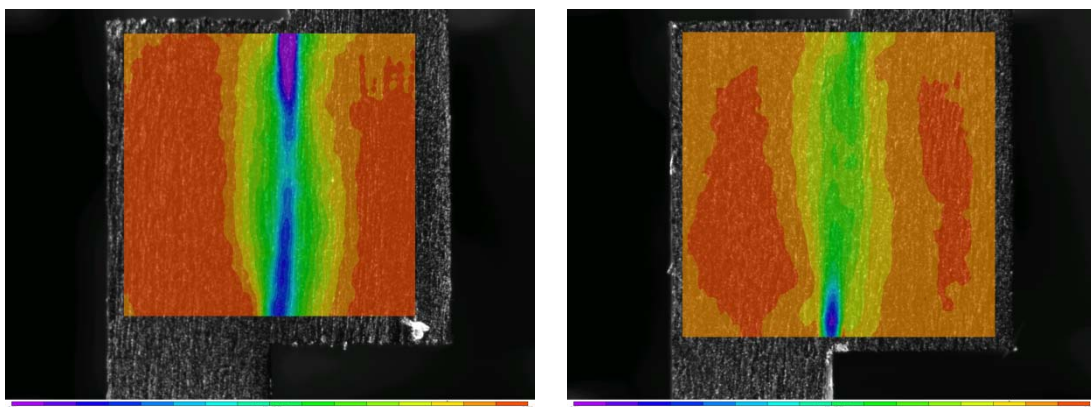


Abbildung 52: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz, verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem vierten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.

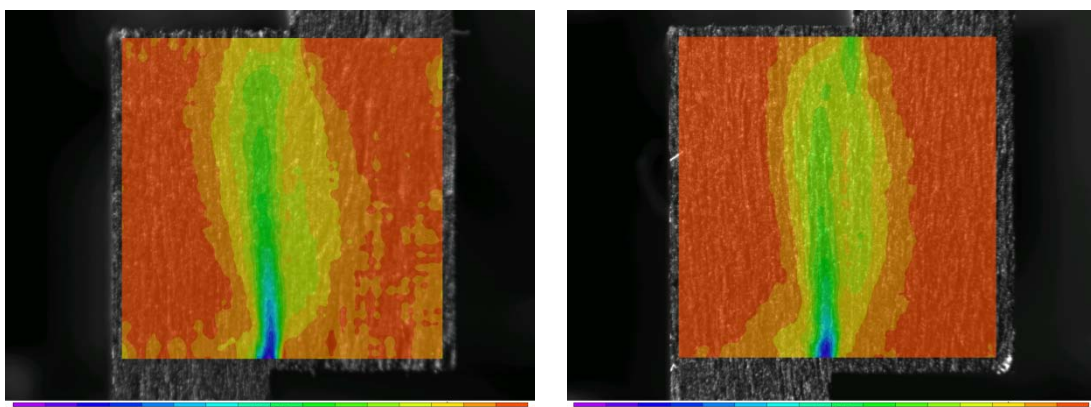


Abbildung 53: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz, verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem letzten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.

In den Falschfarbenbildern war klar der Bereich der Klebfuge zu erkennen. In diesem Bereich waren die grössten Verschiebungen und somit auch die grössten Spannungen zu erkennen. Es gab keinen grossen Spannungsunterschied zwischen den Proben, die aus dem Randbereich oder aus der Mitte des Probenbrettes stammten. Auch hier war wieder zu erkennen, dass die Spannungsverteilung auf der Probenoberfläche mit der Zunahme der Behandlungsdauer sich nicht wesentlich verändert hatte.

5.2.5 Einfluss der verwendeten Schnellalterungstests

Da sich bis jetzt in den dargestellten Ergebnissen keine klaren Unterschiede zwischen den Klebstoffen ergeben haben und sehr grosse Streuungen der einzelnen Messwerte aufgetreten sind, wurde entschieden für die Analyse der Wirksamkeit der verwendeten Schnellalterungstests die Mittelwerte der drei eingesetzten Klebstoffe zu nehmen.

Als Indiz für den Grad der Delaminierung in der Klebfuge wurde die Restfestigkeit gewählt. Entstand eine Delaminierung durch das einwirken einer Schnellalterungsmethode zeigt sich dies durch eine Verminderung der Zugscherfestigkeit. Da sich durch eine Delaminierung die Haftung der Füge Teile verringert und so eine kleinere Bruchfläche entsteht, die wiederum zu einer geringeren Festigkeit führt. Dabei wurden die Werte aus den Vollholzproben sowie die der Referenzproben ausgeschlossen, um nur die Werte der durch die Schnellalterungstests beanspruchten Proben zu analysieren. Die so erhaltenen Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten nach den Schnellalterungstests natürliche und künstliche Bewitterung sowie der Wechselklimalagerung sind in der Abbildung 54 grafisch dargestellt.

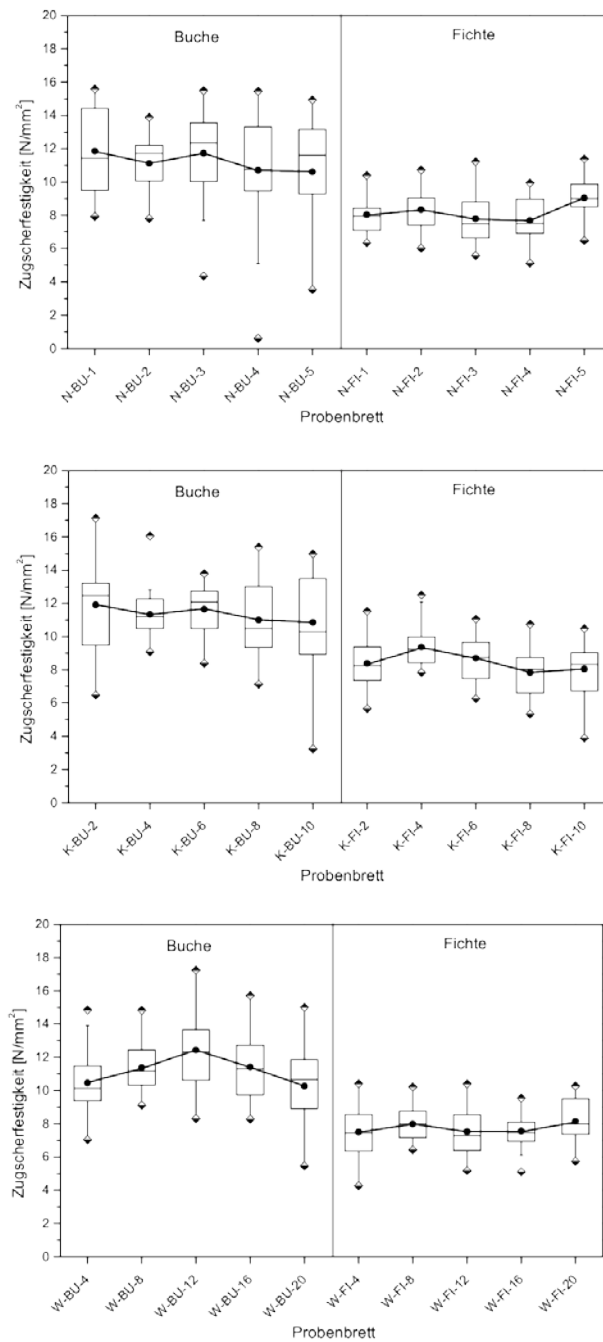


Abbildung 54: Verlauf der Änderung der Zugscherfestigkeit mit Zunahme der Behandlungsdauer als Indiz für den Delaminierungsgrad der Klebfuge ausgelöst durch die drei verschiedenen Schnellalterungstests.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N), künstliche Bewitterung (K), Wechselklimalagerung (K); 2. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI)); 3. Stelle: Behandlungsdauer in Anzahl Zyklen oder Monaten.

Alle drei Schnellalterungstests konnten keine oder nur ungenügende Delaminierungen in den Klebefugen hervorrufen. Dabei betrug die durchschnittliche Zugscherfestigkeit bei den natürlich bewitterten Buchenproben $\bar{X} = 11.1 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 2.77 \text{ N/mm}^2$; $v = 25\%$), bei den künstlich bewitterten $\bar{X} = 11.1 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 2.47 \text{ N/mm}^2$; $v = 22\%$) und bei der Wechselklimalagerung $\bar{X} = 11.1 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.95 \text{ N/mm}^2$; $v = 18\%$). Die Mittelwerte bei den Fichtenproben sehen wie folgt aus. Bei den natürlich bewitterten Proben $\bar{X} = 8.1 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.38 \text{ N/mm}^2$; $v = 17\%$), bei den künstlich bewitterten $\bar{X} = 8.4 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.64 \text{ N/mm}^2$; $v = 20\%$) und bei der Wechselklimalagerung $\bar{X} = 7.7 \text{ N/mm}^2$ ($s_x = 1.39 \text{ N/mm}^2$; $v = 18\%$).

Zieht man über die Verläufe der Medianwerte der einzelnen Behandlungszyklen oder –monate lineare Trendlinien, ist bei den Buchenproben bei der natürlichen und künstlichen Bewitterung sowie bei den Fichtenproben der künstlichen Bewitterung eine leichte Abnahme der Zugscherfestigkeit mit der Zunahme der Behandlungsdauer erkennbar. Jedoch ist dieser Trend mit Vorsicht zu betrachten, da die Trendlinie im Streubereich der Messwerte liegt. Bei den Fichtenproben der natürlichen Bewitterung und der Wechselklimalagerung ist nur eine geringe Ab- oder Zunahme der Zugscherfestigkeit festzustellen. Die Buchenproben der Wechselklimalagerung besitzt bis zum zwölften Zyklus einen Anstieg der Zugscherfestigkeit und ab diesem Zyklus wieder einen Abfall der Zugscherfestigkeit auf das Anfangsniveau.

Obwohl die Beanspruchung bei der künstlichen Bewitterung sehr stark war, was sich in der Krümmung der Probenbretter widerspiegelt hat (siehe Kapitel 4.6.2.1: Probleme bei der künstlichen Bewitterung), zeigen auch diese Ergebnisse keine klaren schlechtere Werte gegenüber den zwei anderen Schnellalterungstests.

Somit ist ersichtlich, dass die eingesetzten Schnellalterungstests bei den entsprechenden Klebstoffen und Behandlungsdauern keine ermittelbaren Alterungseffekte in den Klebfugen hervorrufen konnte.

5.2.6 Korrelationen zwischen der Restfestigkeit und der zerstörungsfreien Erkennung von Delaminierungen

Nach der Analyse der einzelnen Untersuchungen, wird in diesem Abschnitt versucht, eine Korrelation aus den Ergebnissen der Restfestigkeit und der Änderung der Schalllaufzeit sowie der Eigenfrequenz nach einer Schnellalterung der Klebfuge zu finden. Dabei wurden die Einzelwerte der Schalllaufzeitänderung bzw. der Eigenfrequenzänderung auf die y-Achse aufgetragen und die der Zugscherfestigkeit auf die x-Achse. Anschliessend wurden lineare Trendlinien durch die Einzelwerte der jeweiligen Holzart gelegt. Detailliertere Werte über die linearen Trendlinien befinden sich im Anhang D. Man erhoffte sich mit Hilfe der Trendlinien eine Aussage über eine Zu- oder Abnahme der Schalllaufzeit oder Eigenfrequenz bei einer Verringerung der Zugscherfestigkeit machen zu können, was auf eine Delaminierung in der Klebfuge hinweisen könnte.

5.2.6.1 *Korrelation zwischen der Restfestigkeit und der Laufzeitänderung bei Durchschallung*

Es wurden bei beiden Holzarten lineare Korrelationen zwischen der Restfestigkeit und der Schalllaufzeitänderung über alle Klebstoffe und Zyklenanzahlen gezogen. Dabei sind die Buchenwerte und die dazugehörige lineare Trendlinie in der Farbe Grün in die Diagramme eingezeichnet und die Fichtenwerte in Blau. Die unterschiedlichen Formen der Punkte geben die Zyklenanzahl an.

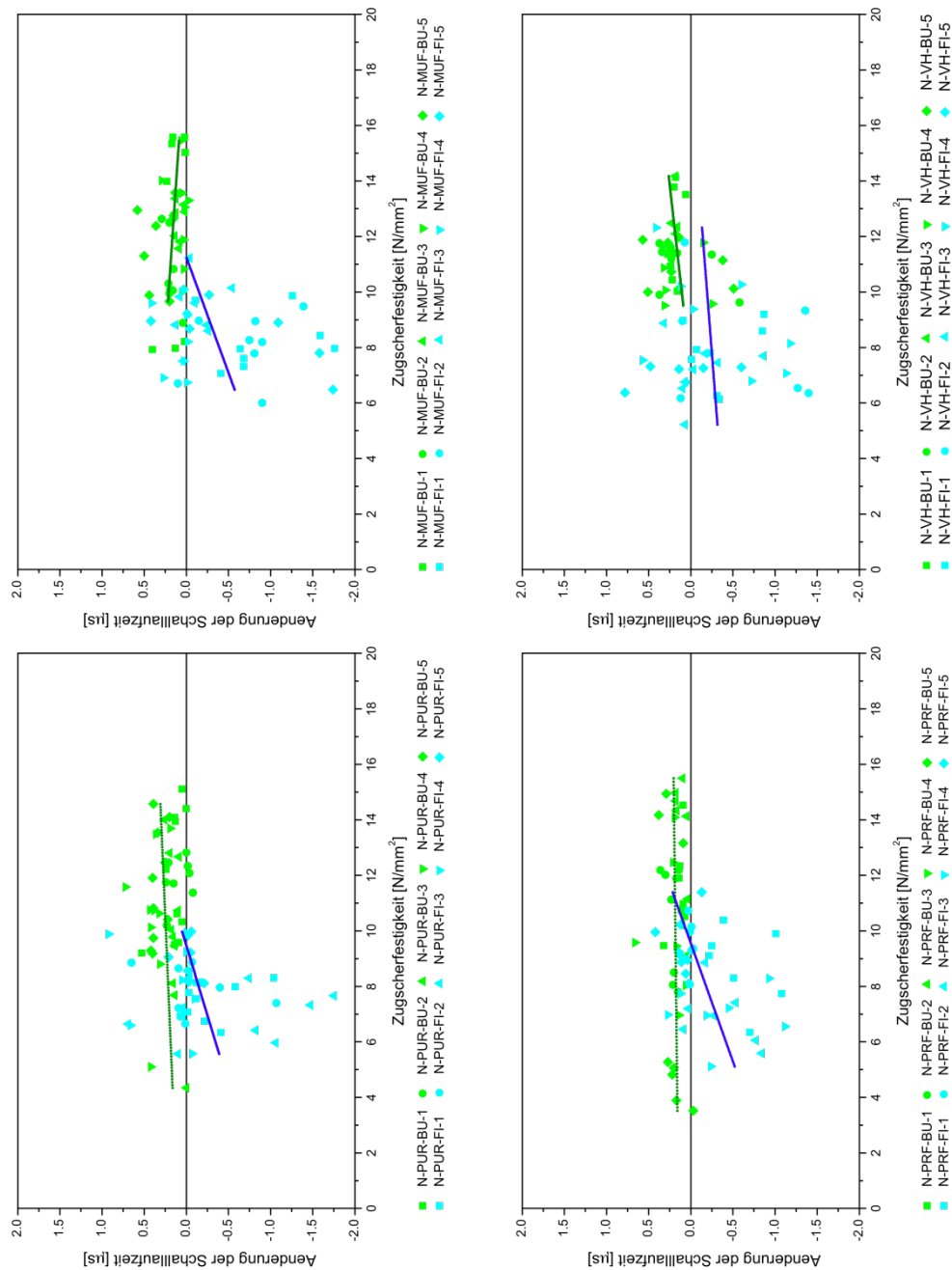


Abbildung 55: Vergleich der Ergebnisse der Änderung der Schalllaufzeit auf der y-Achse und der Zugscherfestigkeit auf der x-Achse. Die Resultate stammen vom Schnellalterungstest der natürlichen Bewitterung. Die grüne Linie ist der lineare Trend der Buchenproben, die blaue Linie zeigt den Trend der Fichtenproben.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI)); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Anzahl Zyklen.

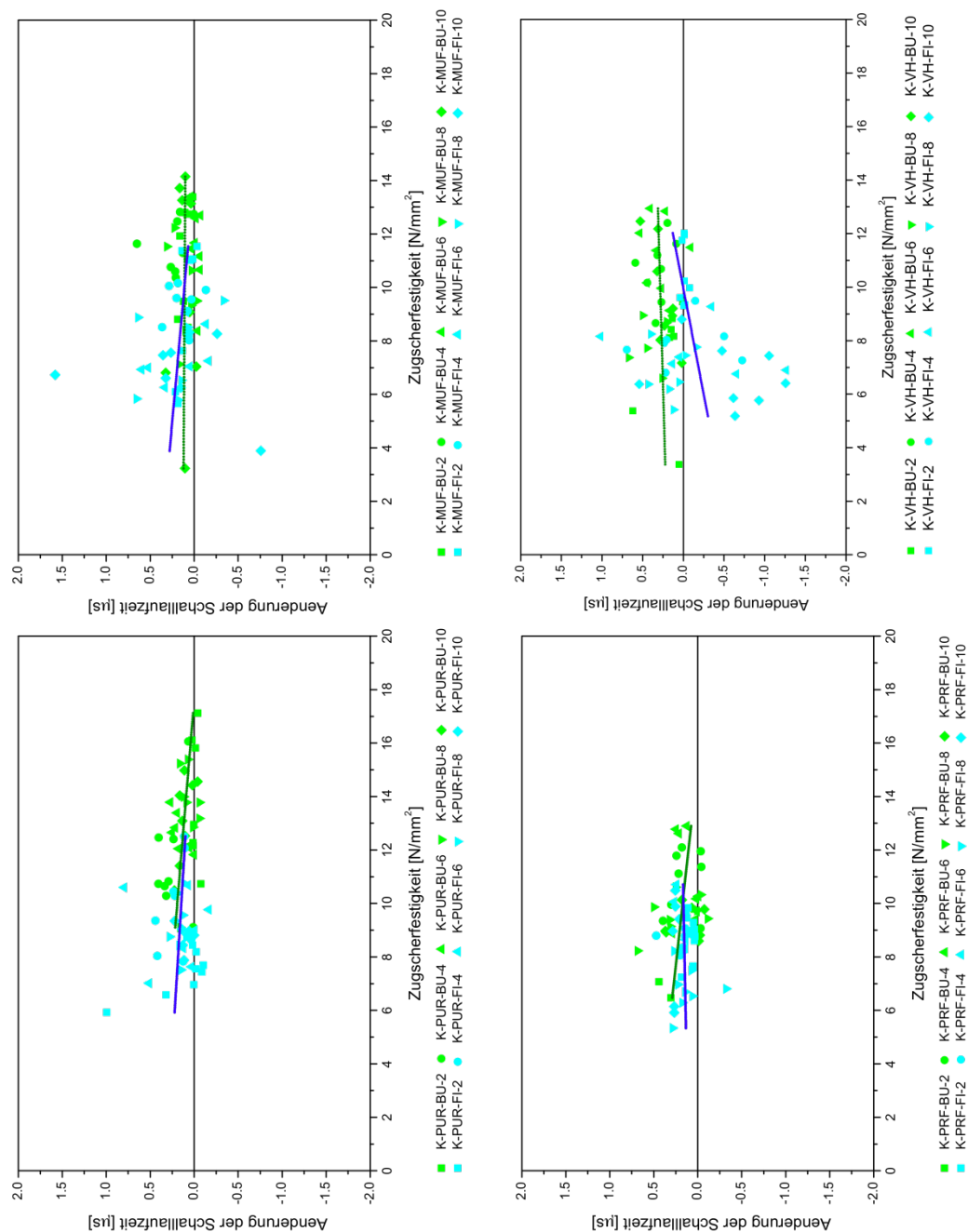


Abbildung 56: Vergleich der Ergebnisse der Änderung der Schalllaufzeit auf der y-Achse und der Zugscherfestigkeit auf der x-Achse. Die Resultate stammen vom Schnellalterungstest der künstliche Bewitterung. Die grüne Linie ist der lineare Trend der Buchenproben, die blaue Linie zeigt den Trend der Fichtenproben.

Abkürzungen: 1. Stelle: künstliche Bewitterung (K); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI)); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Anzahl Zyklen.

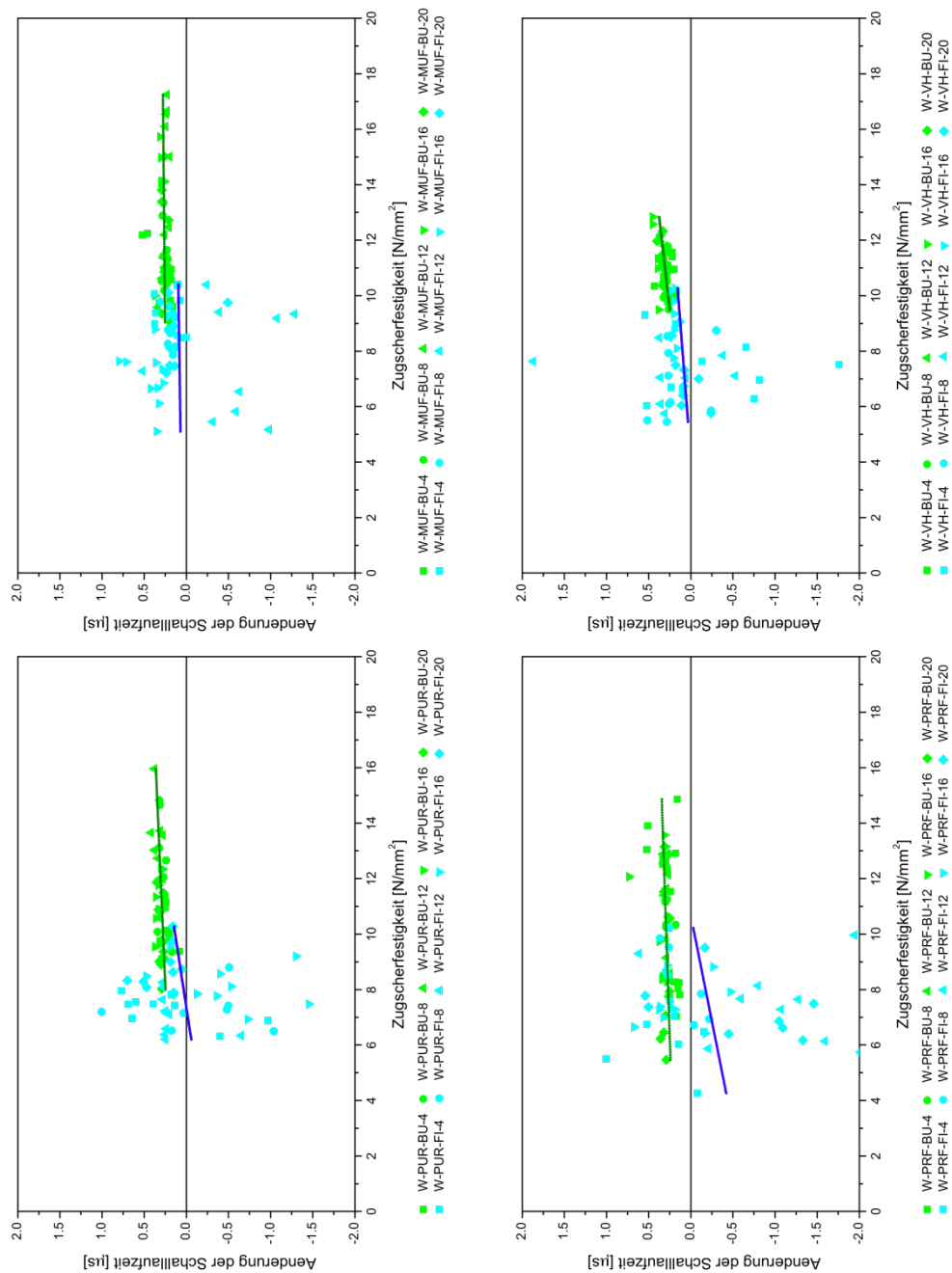


Abbildung 57: Vergleich der Ergebnisse der Änderung der Schalllaufzeit auf der y-Achse und der Zugscherfestigkeit auf der x-Achse. Die Resultate stammen vom Schnellalterungstest der Wechselklimalagerung. Die grüne Linie ist der lineare Trend der Buchenproben, die blaue Linie zeigt den Trend der Fichtenproben.

Abkürzungen: 1. Stelle: Wechselklimalagerung (K); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI)); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Anzahl Zyklen.

Bei der Korrelation zwischen der Zugscherfestigkeit und der Schalllaufzeitänderung nach der Behandlung mit den verschiedenen Schnellalterungstests resultierten sehr geringe Bestimmtheitsmasse. Die Buchenproben besaßen eine durchschnittliche Spannweite der Bestimmtheitsmasse von -0.032 bis 0.204 und die Fichtenproben eine von -0.024 bis 0.216. Im Durchschnitt, über die gesamte Korrelation betrachtet, ergab das Bestimmtheitsmasse bei der Buche von $\bar{X} = 0.043$ bzw. bei der Fichte von $\bar{X} = 0.01$. Somit ist die Aussagekraft der Trendlinien nur bedingt gegeben.

Betrachtet man die Steigung a der linearen Trendlinien mit der Funktion $y=ax+b$, ergaben die Steigungen a Spannweiten von -0.033 bis 0.038 bei den Buchenproben und von -0.027 bis 0.12 bei der Fichte. Das ergab im Durchschnitt eine Steigung a bei der Buche von 0.004 und bei der Fichte von 0.044. Somit ist mit einer solch grossen Spannweite der Steigung sowie des Bestimmtheitsmasses eine Aussage über eine Zu- oder Abnahme der Schalllaufzeitänderung, bezogen auf die Restfestigkeit, nicht möglich.

5.2.6.2 *Korrelation zwischen der Restfestigkeit und der Frequenzänderung bei der Eigenfrequenzmessungen*

Zum Anfang ist hier noch zu erwähnen, dass die Auswertung der Probenbretter nach einer künstlichen Bewitterung nicht mehr möglich war. Durch die einseitige Beanspruchung der Probenbretter durch Wasser und Wärme krümmten sich diese. Um die Krümmung der Probenbretter zu minimieren, wurden die Bretter in der Mitte aufgeschnitten und ergaben durch die geänderte Probengeometrie stark unterschiedliche Eigenfrequenzen (siehe Kapitel 4.6.2.1.).

Die Restfestigkeit der Probenbretter, die zur Korrelation verwendet wurden, waren Mittelwerte aus den jeweilig geprüften Zugscherproben der entsprechenden Probenbrettern. In den zwei nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 58) sind die zwei Schnellalterungstests getrennt voneinander dargestellt. Dabei sind die lineare Trendlinie der Buche in der Farbe Grün in die Diagramme eingezeichnet und die der Fichte in Blau. Die unterschiedlichen Formen der Punkte geben die einzelnen Probenbretter an. Die Korrelation zwischen der Restfestigkeit und der Eigenfrequenzänderung ist mit einer linearen Funktion $y=ax+b$ über alle Klebstoffe und Zyklenanzahlen gelegt worden.

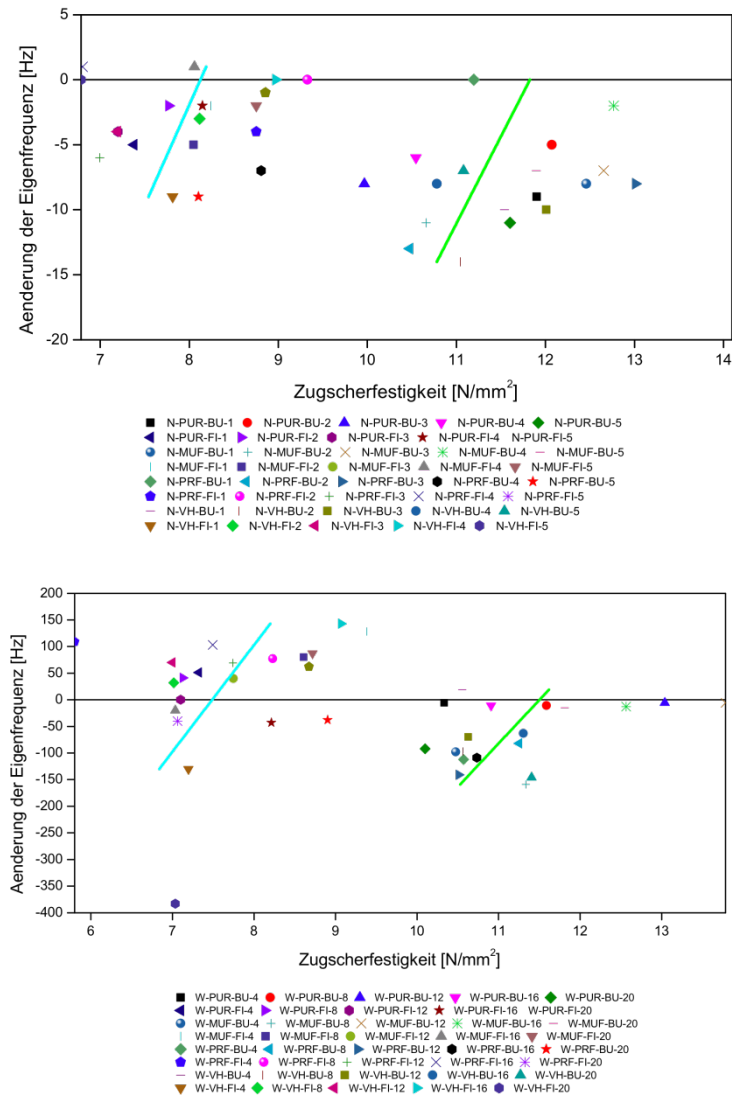


Abbildung 58: Korrelation der Ergebnisse der Änderung der Eigenfrequenz auf der y-Achse und der Zugshearfestigkeit auf der x-Achse. Im oberen Diagramm ist die Korrelation der Ergebnisse aus dem Schnellalterungstest der natürlichen Bewitterung aufgezeigt, im unteren Diagramm die der Wechselklimalagerung. Die grüne Linie zeigt die Trendlinie der Buchenproben, die blaue Linie zeigt den Trend der Fichtenproben.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N), Wechselklimalagerung (W); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Anzahl Zyklen.

Die linearen Trendlinien bei den natürlich bewitterten Proben in der oberen Abbildung 58 besitzen Bestimmtheitsmasse von $R^2 = 0.016$ bei der Buche (grüne Linie) bzw. $R^2 = 0.011$ bei der Fichte (blaue Linie). Dabei weist die Trendlinie der Buchenproben eine Steigung $a = 0.075$ und die Fichtenproben $a = 0.065$ auf. Bei den Proben der Wechselklimalagerung (untere Abbildung 58) sehen die Ergebnisse der Trendli-

nie wie folgt aus: $R^2 = 0.046$ und $a = 0.006$ bei der Buche (grüne Linie) bzw. $R^2 = 0.089$ und $a = 0.005$ bei der Fichte (blaue Linie).

Bei der Korrelation zwischen der Restfestigkeit und der Eigenfrequenzänderung war ein allgemeiner Trend erkennbar. Mit zunehmender Zugscherfestigkeit der jeweiligen Holzart steigt auch die Eigenfrequenzänderung. Zu beachten ist noch die relativ grosse Streuung der Messwerte, die sich in den kleinen Werten der Bestimmtheitsmasse widerspiegeln. Um die obige Aussage wirklich zu bestätigen, müssen noch zusätzliche Untersuchungen mit einem grösseren Probenumfang gemacht werden.

5.3 **Ergänzende Versuche:** Erkennung von künstlich erzeugten Delaminierungen an Brettschichtholz

5.3.1 **Messungen mit Durchschallungsmethoden**

Nachfolgend werden die Messergebnisse der Versuche mit den Messgeräten Sylvatest Duo und USH (Sendesignal: 22 kHz, 4 Perioden) dargestellt. In den Abbildung 59 bis Abbildung 64 sind zusätzlich die Konturen der künstlichen Fehlverklebungen sowie die sie umgebenden Nuten verzeichnet. Ebenso sind die visuell erfassten Holzfehler (Tabelle 29) abgebildet. Bei den parallel zur Längsachse ausgerichteten Stellen handelte es sich um Harzgallen, die restlichen skizzieren vorhandene Äste. Vereinzelt von den Seiten ausgehende, unschraffierte Areale deuten Äste an, deren genaue Ausrichtung und Grösse nicht bekannt war.

Bei allen drei Prüfkörpern liessen sich die verschiedenen Fehlverklebungen⁴ (FV) anhand der Laufzeitunterschiede erkennen. Allerdings bestanden grosse Unterschiede hinsichtlich der Trennschärfe bzw. der sicheren Detektierbarkeit (vgl. Tabelle 7).

⁴ Zur sprachlichen Vereinfachung werden die Fehlverklebungen (FV) entsprechend der Anschauung der Abbildungen dieses Kapitels mit links (Länge=0.25 - 0.325/0.4m) bzw. rechts (Länge=0.6 - 0.75m) bezeichnet.

Tabelle 7: Laufzeitspannen der verschiedenen Prüfkörper-Bereiche. Dabei besitzt Prüfkörper (PK) A eine durchgehende Fehlverklebungsstellen (FV), PK B Fehlverklebungsstellen die auf einer Seite im BSH-Träger enden und auf der anderen Seite bis nach aussen laufen und der PK C besitzt Fehlverklebungen die im BSH liegen ohne Zugang zum Rand.

PK	Messgerät	Laufzeitspannen der verschiedenen Prüfkörper-Bereiche [µs]		
		intakter Bereich	FV (Länge=0.25...0.325/0.4m)	FV (Länge=0.6...0.75m)
A	Sylvatest Duo	124...134	128...145	128...145
	USH	(123)141...153	147...162	147...168
B	Sylvatest Duo	127...138	129...136	130...138
	USH	129...162	135...156	138...159
C	Sylvatest Duo	123...141	126...133	128...144
	USH	126...162	144...156	(129)147...165

Bei Prüfkörper A (Abbildung 59 und Abbildung 60) hoben sich die Konturen der Fehlverklebungen anhand der Schalllaufzeiten deutlich von denen ihrer intakten Umgebung ab.

Bezogen auf die Absolutwerte schwanken die Laufzeiten der intakten Bereiche bei beiden Messgeräten um etwa 8.5 %, das Erscheinungsbild ist relativ homogen. Dabei zeigte sich die Tendenz, dass bei Prüfkörper A die Laufzeiten von einer Längskante zur anderen abnehmen (Abbildung 59 und Abbildung 60, jeweils von unten nach oben).

Die Laufzeiten im Bereich der Fehlverklebungen lagen überwiegend oberhalb der Maximalwerte der intakten Abschnitte, teilweise waren sie um bis zu 17 % erhöht. Der untere Abschnitt der linken sowie der mittlere Abschnitt der rechten Fehlverklebung traten weniger stark hervor. Einige Messpunkte im Zentrum der rechten Fehlverklebung liessen keine Laufzeiterhöhung gegenüber den intakten Bereichen erkennen.

Die Übergangszone, in der sich die Laufzeiterhöhung vollzog, betrug bei Sylvatest Duo 1.3 - 3.8 cm (entspricht 2...4 Messpunkten in Längsrichtung). Die Messergebnisse des USH bildeten die Konturen der Fehlverklebungen mit einer Übergangszone von 2.5 cm ab (entspricht 2 Messpunkten in Längsrichtung).

Bezogen auf die gesamten Laufzeitspannen lagen die Überschneidungen der Laufzeiten der verschiedenen PK-Bereiche mit $6\text{ }\mu\text{s}$ bei etwa 29% (Sylvatest Duo) bzw. 22% (USH).

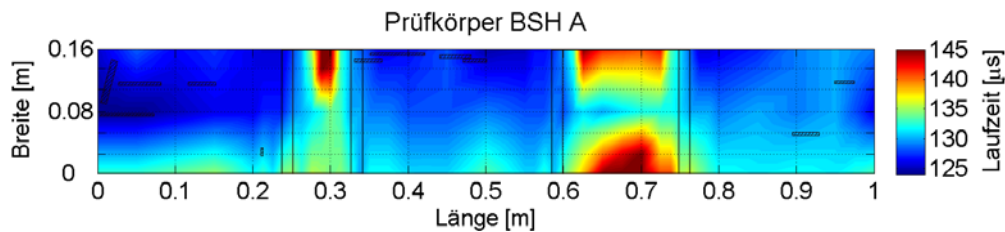


Abbildung 59: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH A bei 210 mm Dicke (Sylvatest)

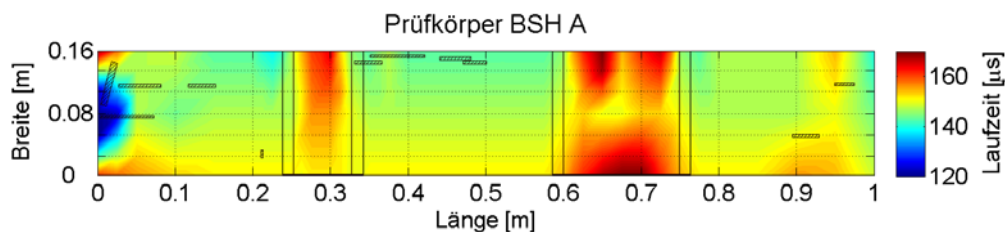


Abbildung 60: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH A bei 210 mm Dicke (USH)

Bei Prüfkörper B (Abbildung 61 und Abbildung 62) liessen sich die Konturen der Fehlverklebungen anhand der Schalllaufzeiten erkennen, jedoch waren sie von ihrer intakten Umgebung erheblich schwerer zu differenzieren. Dabei war zu beachten, dass sich die linke Fehlverklebung mit ihren geringeren Abmessungen weniger stark von der Umgebung abhob als die rechte, grössere Fehlverklebung.

Das Erscheinungsbild der intakten Bereiche war bei beiden Messgeräten sehr inhomogen, lokale Schwankungen waren nur bedingt bei beiden Messergebnissen wiederzufinden. Die Laufzeiten variieren, bezogen auf die Absolutwerte bei Sylvatest Duo, um etwa 8.5% bzw. bei USH um bis zu 25%.

Im Bereich der Fehlverklebungen waren die Laufzeiten gegenüber der näheren Umgebung deutlich erhöht, jedoch lagen sie nicht über den Maximalwerten der theoretisch intakten Abschnitte. Diese Maxima lagen in der oberen Längsnut, welche an die rechte Fehlverklebung (Breite = 0.135 m) angrenzte. Mit beiden Messgeräten konnte im oberen Abschnitt (Breite = 0.1075 m) der linken Fehlverklebung keine, bei der rechten nur eine geringe Laufzeiterhöhung gegenüber den intakten Bereichen gemes-

sen werden. Abgesehen davon war die Übergangszone, in der sich die Laufzeiterhöhung vollzieht, 2.5 cm breit.

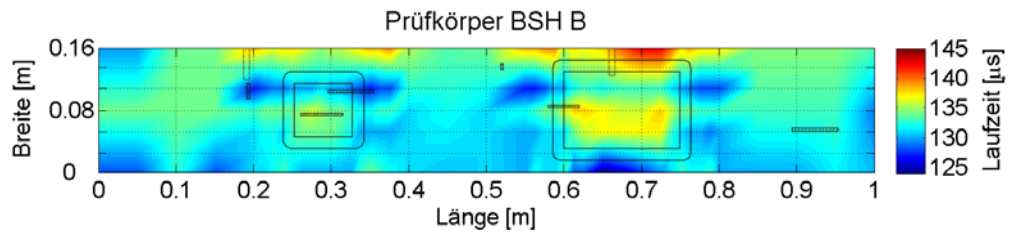


Abbildung 61: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH B bei 210 mm Dicke (Sylvatest)

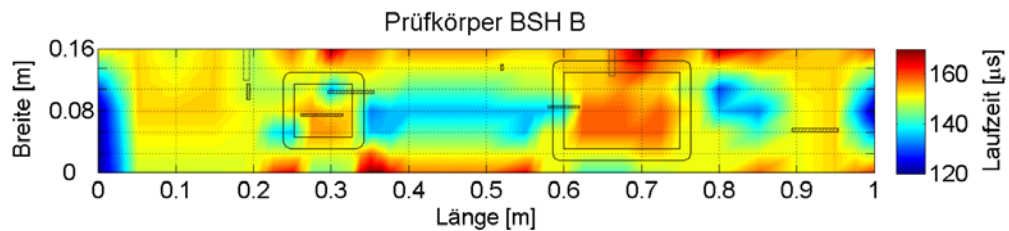


Abbildung 62: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH B bei 210 mm Dicke (USH)

Bei Prüfkörper C (Abbildung 63 und Abbildung 64) waren im Bereich der Fehlverklebungen deutliche Erhöhungen der Schalllaufzeiten detektierbar, jedoch ebenso im oberen Drittel des Prüfkörpers (Breite = 0.10 - 0.16 m, Länge = 0 - 1 m). Insbesondere aufgrund dieses Phänomens war das Erscheinungsbild der intakten Bereiche bei beiden Messgeräten inhomogen. Die Laufzeiten variieren, bezogen auf die Absolutwerte bei Sylvatest Duo, um rund 14.5% bzw. bei USH um bis zu 28.5%.

Im Bereich der Fehlverklebungen waren die Laufzeiten gegenüber der näheren Umgebung deutlich erhöht, jedoch lagen sie nicht bzw. nur minimal über den Maximalwerten der intakten Abschnitte. Die erwarteten Konturen wurden nur bedingt durch die Messergebnisse wieder gespiegelt. Die Übergangszone, in der sich die Laufzeiterhöhung vollzog, war mit zumeist 2.5 - 5 cm relativ gross.

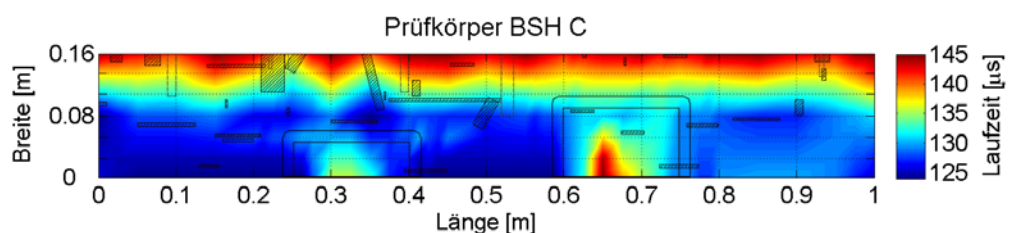


Abbildung 63: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH C bei 210 mm Dicke (Sylvatest)

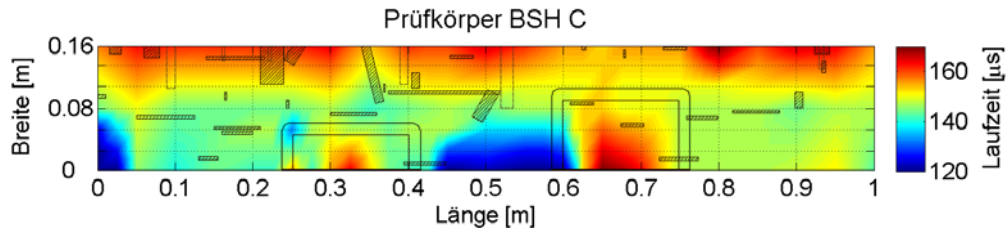


Abbildung 64: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH C bei 210 mm Dicke (USH)

5.3.1.1 Wood pole Tester

In Abbildung 65 sind die Ergebnisse der Untersuchung mit dem Wood pole Tester dargestellt. Der Verlauf der Säulen zeigt eine eindeutige Erhöhung der Laufzeiten bei den eingebauten Fehlverklebungen zwischen 195 und 310 mm in der z-Richtung (aufgetragen auf der x-Achse des Diagramms). Dies war bei beiden Messlinien im Abstand von 12 mm und 80 mm in y-Richtung von der Probenkante ersichtlich.

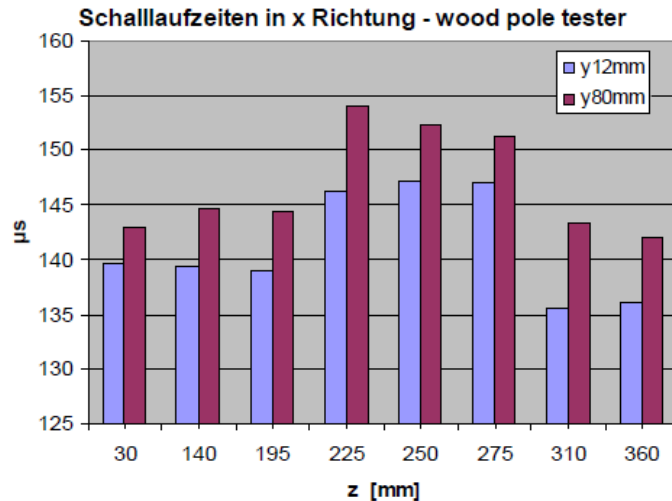


Abbildung 65: Das Diagramm zeigt die Ergebnisse der Laufzeit in x-Richtung mit dem Messgerät Wood Pole Tester.

In der Abbildung 66 sind die Laufzeiten entlang der Klebfugen der einzelnen Lamellen des BSH aufgetragen. Die unterschiedlichen Laufzeiten zeigten die Inhomogenität des Holzes, welches im BSH zum Einsatz kam.

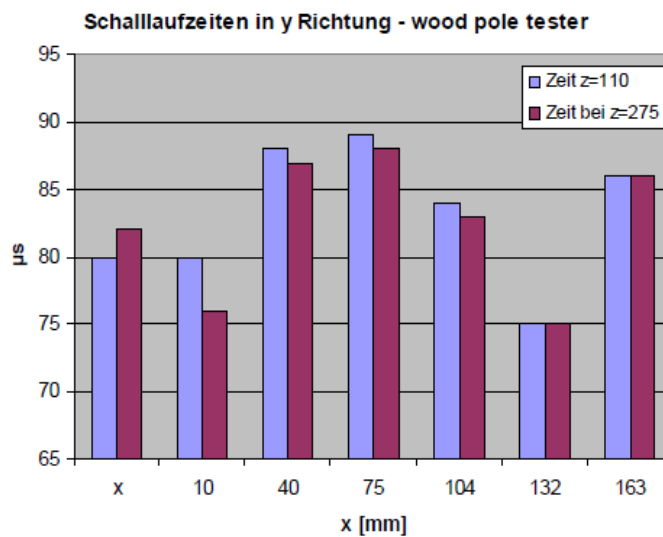


Abbildung 66: Das Diagramm zeigt die Laufzeiten in y Richtung (entlang der Klebfuge).

5.3.1.2 PiCUS Hardware 2.0

Der Defekt in der Klebfuge zwischen der zweiten und dritten Lamelle im BSH zeichnete sich anhand der Abbildung 67 in Konturen ab. Die guten Verbindungen der Messpunkte 14, 15 und 16 zur gegenüber liegenden Seite verbargen jedoch die Fehlverklebung.

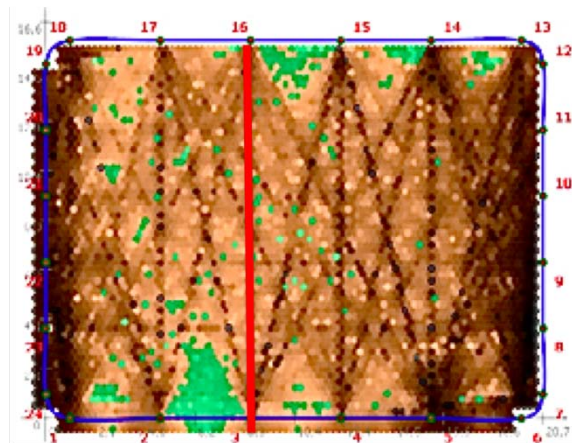


Abbildung 67: Visuell dargestellt die Ergebnisse der Untersuchungen mit PiCUS Hardware 2.0 an Brettschichtholz mit eingebauten Fehlverklebungen. Die rote Linie zeigt die Position der Fehlverklebung.

Vorschläge zur Verbesserung der Messdaten-Qualität:

- Auch die intakten Verklebungen stellten eine Inhomogenität dar, die die Schallausbreitung beeinflusst.

- Man sollte in der Auswertung die unterschiedliche Faserrichtung des Holzes berücksichtigen.
- Aufgrund der geringen Abmessungen fallen Geometriefehler stark ins Gewicht, ggf. sollte man die Daten von unmittelbar benachbarten Sensoren nicht bewerten und die Schraubenlänge berücksichtigen.
- Die Sensoren sollten etwas unempfindlicher gemacht werden, da der kleine Probekörper ein sehr guter Schallleiter war. Die Messwerte sollten dann stabiler werden.
- Man sollte ein Piezo-Aktor als Impulsgeber einsetzen. Man hat Versuche an der BAM an Betonkörpern durchgeführt mit Signalgeber aus Piezokristallen. Leider war dieser Aktor nicht unmittelbar mit der PiCUS Hardware (2.0) kompatibel.

5.3.2 Elektrische Impedanzmessungen

Das trockene Holz erweist sich als guter Isolator. Auf der Stromeinkopplenseite war die zur Verfügung stehende Spannung (etwa 100V) nicht hoch genug oder/und das Messgerät nicht empfindlich genug, um einen Stromfluss nachzuweisen. Auf der Spannungsmessseite wurden durch die Hochohmigkeit von Probekörper und Gerätes über die Messkabel zu viele Störungen (Netzbrummen) eingefangen.

Der Screenshot des Oszilloskopes in Abbildung 68 zeigt, dass bei der zweiten Anordnung der spannungsmessenden Elektroden M-N die an A-B angelegte Spannung (grünes Rechtecksignal) die Spannungsmessung an M-N (blaue Kurve) beeinflusste. Mit empfindlicherer Messtechnik könnten also Ergebnisse erzielt werden. Leider war das blaue Spannungssignal aufgrund der Hochohmigkeit von Probe und Messgerät mit einem Netzbrummen überlagert.

Es kann zu diesem Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden, welche Informationen in dem Signal enthalten sind.

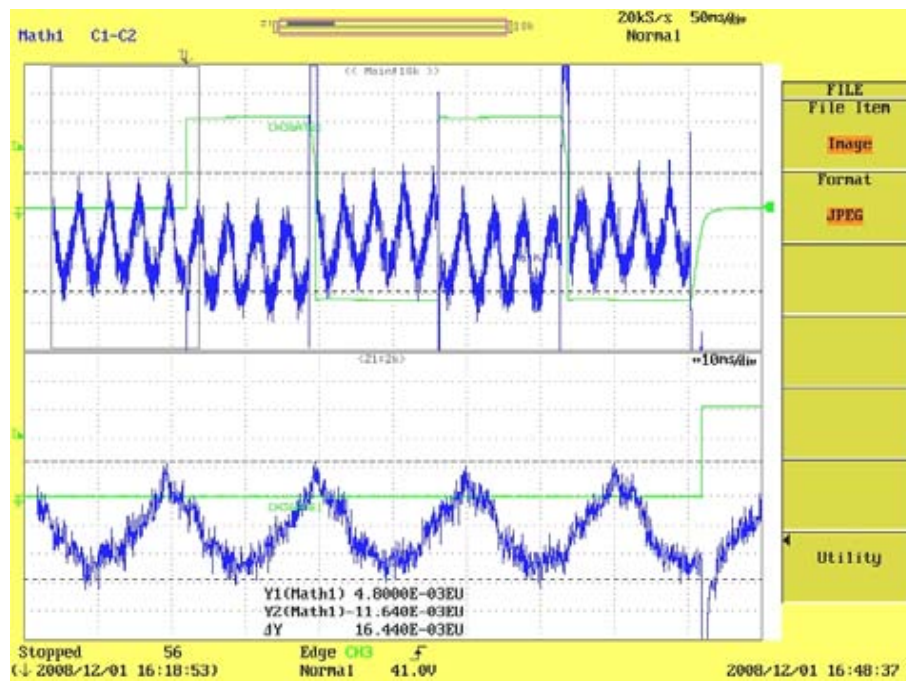


Abbildung 68: Screenshot des Oszilloskopes bei einer elektrischen Impedanzmessung. Grünes Rechtecksignal angelegte Spannung. Blaues Signal Spannungsmessung.

6 Diskussion

6.1 Vorversuch:

Ermittlung der Verlässlichkeit von Ultraschall zur Detektierung von Fehlstellen in Klebfugen

Bei den Vorversuchen sollte mit definierten Fehlverklebungen die Eignung der Ultraschalltechnik für die Erkennung von Verklebungsfehlern untersucht werden. Es wurden zweilagige faserparallel verklebte Fichtenproben untersucht. Dabei wurden vier Varianten verschiedener Fehlverklebungsstellen hergestellt (A: massiv, unverklebt; B: vollflächig verklebt; C: auf halber Länge verklebt; D: nur an den Rändern verklebt).

Die Laufzeitmessungen an den verschiedenen Prüfkörper-Varianten zeigen, dass Fehlstellen ohne Klebstoff in Form der Varianten C und D zu deutlichen Erhöhungen der Schalllaufzeit (bezogen auf die Gesamtlaufzeit) gegenüber fehlerfreien Verklebungen bzw. Massivholz führen.

Während die Variation der Laufzeiten innerhalb eines Prüfkörpers mit etwa 7.5 - 12.5 % (15 %) relativ gering war, unterscheiden sich die Laufzeitniveaus der verschiedenen Prüfkörper zum Teil mit 15 - 25 % deutlich (Abbildung 76 bis Abbildung 78). Dies war aufgrund der Variabilität des Werkstoffs Holz zu erwarten, allerdings konnten im vorliegenden Fall die Ursachen nicht eindeutig identifiziert werden. Weder Jahrringabstand noch die Rohdichte wiesen nennenswerte Unterschiede auf, einzig die Abweichung von der idealen tangentialen Durchschallungsrichtung war bei A12 geringfügig grösser, als bei den übrigen Prüfkörpern.

Eine Unterscheidung zwischen verklebtem Holz mit intakter Klebfuge und Massivholz mittels Schalllaufzeit war nicht möglich. Die Laufzeitniveaus waren nahezu identisch, mögliche Schwankungen waren auf das jeweilige Material zurückzuführen.

Die Übergangszonenbreite zwischen verklebten und unverklebten Bereichen von 2.5 - 3.5 cm war relativ klein, zumal eine Fehlstellenerkennung meist schon vor Errei-

chen der maximalen Laufzeiterhöhung anhand des starken Anstiegs möglich war. In vielen Fällen zeigten die Messergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den realen Klebfugenverläufen (Abbildung 82 bis Abbildung 91). Allerdings war es aufgrund des Prüfkopfdurchmessers von 45 mm und der damit notwendigen Interpolation der Messdaten im Randbereich ($\approx 1/2$ des Prüfkopfdurchmessers) nicht möglich, den Verlauf von Fehlstellen in diesem Bereich zu detektieren. Ebenso wurden lokale Unregelmässigkeiten der Klebfuge bis etwa 2 cm, wie z. B. bei PK C8 (Anhang F, Abbildung 84), nicht erkannt. Möglicherweise liesse sich die Genauigkeit der Fehlstellenerkennung noch durch eine Erhöhung der Messpunkte verbessern.

Anhand der exemplarischen Kombination zweier PK-Varianten (C7/D9) konnte gezeigt werden, dass sich tendenziell der erwartete Überlagerungseffekt (Abbildung 41) einstellt. Somit war es möglich, einzelne Fehlstellen in einer Klebfuge von mehreren, sich überlagernden Fehlern in verschiedenen Klebfugen im gleichen Bereich eines Prüfkörpers zu unterscheiden. Allerdings erwies sich eine weitere Erhöhung der Dicke mit zusätzlichen Defekten über die Kombination von zwei PK hinaus (4 Lamellen à 5 mm, 1 - 2 Klebfugen mit Defekten) als nicht sinnvoll. Die mit jeder defekten Klebfuge einhergehende Signalabschwächung erfordert eine Verstärkung, welche mit dem verwendeten Messgerät nicht realisierbar war.

Die Ursache des beobachteten Effektes beruhte anscheinend nicht auf einer Laufzeitverlängerung infolge eines längeren Weges, den die Schallwellen im Bereich der Fehlstellen zurücklegen mussten. Dabei sollten die Laufzeiterhöhungen von den Randbereichen hin zum Zentrum der Fehlstellen infolge des zunehmenden Weges ansteigen. Da die verklebten und unverklebten Bereiche sich untereinander zwar deutlich unterscheiden, für sich betrachtet aber relativ homogen waren, musste diese Erscheinung auf einem anderen Effekt beruhen. In Betracht kam hierbei möglicherweise eine Phasenverschiebung der Schallwellen infolge der Überwindung der Fehlstelle um etwa 90 - 125 Grad, welche bei einer Frequenz von 100 kHz die beobachtete Verzögerung von rund 2.5 - 3.5 μ s verursacht hätten.

Dieser Effekt führte bei unverklebten Abschnitten zu einer Erhöhung der Schalllaufzeit um rund 17 - 27 % gegenüber verklebten Bereichen. Sollte die beobachtete Verzögerung unabhängig von Messgerät und Probengeometrie sein, wäre es dennoch

fraglich, ob eine Fehlstellendetektion wie im vorliegenden Fall auch bei deutlich grösseren Bauteilabmessungen möglich wäre. Da mit zunehmender Bauteildicke die Schalllaufzeit zunimmt, wird die darauf bezogene prozentuale Laufzeiterhöhung infolge Fehlstellen immer kleiner. Eine Laufzeiterhöhung in der gemessenen Grössenordnung wird sich an realen Bauteilen vermutlich nicht von Schwankungen aufgrund von Ästen, Reaktionsholz, abweichendem Faserverlauf u. ä. differenzieren lassen.

6.2 Hauptversuch:

Untersuchung der Alterung an Klebfugen

Im Hauptversuch wurden drei Methoden zur künstlichen Alterung von Klebstoff mittels Zugscherprüfung untersucht. Zudem wurden die Klebefuge mit zwei zerstörungsfreien Messmethoden (Durchschallung, Eigenfrequenz) auf mögliche Delaminierungen untersucht. Es wurden zweilagig faserparallel verklebte Buchen- und Fichtenproben geprüft. Für die Verklebung wurden drei verschiedene Klebstofftypen verwendet.

Nach der Restfestigkeitsprüfung der Klebfugen nach einer Behandlung mit den verschiedenen Schnellalterungstests (natürliche und künstliche Bewitterung, Wechselklimalagerung), konnte keine eindeutige Abnahme der Zugscherfestigkeit festgestellt werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass keine Delaminierungen in den Klebfugen erzeugt werden konnte. Denn heutzutage sind handelsübliche Klebstoffe für die BSH-Herstellung in ihrer Formulierung so gut eingestellt, dass man bei einer optimalen Verklebung eine hervorragende Klebverbindung der Füge-teile erhält. Diese Verklebung kann auch mit extremen Schnellalterungstests nicht oder nur ungenügend zerstört werden. Dies haben auch Ergebnisse nach der Delaminierungsprüfung nach der DIN EN 302-2, die an der BFH AHB Biel durchgeführt wurden, widerspiegelt. Hierbei wurden die gleichen Klebstoffe getestet wie im Hauptversuch. Man erhielt beim PUR Klebstoff Risslängen der Klebfuge von 1,07%, beim MUF von 0,69% und beim PRF von 0,57%. Die maximale prozentuale Risslänge nach der Testung von Klebfugen von BSH nach DIN EN 302-2 ist 5%. Somit zeigt auch dieser Delaminierungstest, dass die verwendeten Klebstoffe auch unter extremen Bedingungen halten. Weitere Ergebnisse können im COST E53-Bericht [31] nachgeschlagen werden.

Bei der zerstörungsfreien Erkennung von Delaminierungen in Klebfugen, konnte in den Vorversuchen gezeigt werden, dass eine Ortung von Delaminierungen mittels Ultraschalltechnik möglich ist. Durch die guten Eigenschaften der eingesetzten Klebstoffe, können jedoch keine Delaminierungen erzeugt werden und somit auch keine erkannt werden. Ebenso konnten bei den Messungen der Änderung der Eigenfrequenzmessung keine klaren Aussagen gemacht werden. Deshalb sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen mit Vorsicht zu betrachten.

Die linearen Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Restfestigkeit und der Schalllaufzeitänderung vor und nach einer Schnellalterung der Klebfuge ergab keinen klaren Trend. Bei der Korrelation der Restfestigkeit und der Änderung der Eigenfrequenz war ein Trend erkennbar. Mit zunehmender Zugscherfestigkeit steigt die Eigenfrequenzänderung. Zu beachten ist auch hier die relativ grosse Streuung der Messwerte, die sich in den kleinen Werten der Bestimmtheitsmasse widerspiegelt. Für die obige Aussage wirklich zu bestätigen, müssen noch zusätzliche Untersuchungen mit einem grösseren Probenumfang gemacht werden.

In der Untersuchung der Schnellalterung von Klebstoffen konnte keine oder eine nicht messbare Delaminierungen in den Klebefugen erzeugt werden. Dies zeigten auch Delaminierungstests an der BFH AHB Biel (siehe COST E53-Bericht [32]). Dies Ergebnis kann einen Zusammenhang mit der Wahl der Prüfkörpergeometrie haben. Mit einer Verklebung der Fügeiteile parallel zur Faser, wie dies bei den getesteten Zugscherproben der Fall war, resultieren auch sehr kleine Quell- und Schwindbewegungen des Holzes. Diese können nur geringe Eigenspannungen zwischen den Fügeiteilen erzeugen, die wiederum zu keinen oder ungenügenden Delaminierungen in den Klebfugen führen. Für die Bildung von Delaminierungen in einer Klebfuge ist es von Vorteil, einen kreuzweise verklebten Prüfkörper herzustellen. Bei diesem Prüfkörper haben die gegenseitig angeordneten Fügeiteile eine maximale Behinderung, da sich die unterschiedlichen Quellmasse von Holz (Quellung längs : radial : tangential ist zueinander 1:10-20:15-30) nun gegeneinander absperren. Diese Behinderung kann wiederum zu Eigenspannungen zwischen den Fügeiteilen führen. Übersteigen die Eigenspannungen die Festigkeit des Klebstoffes, kann dies Delaminierungen in der Klebfuge hervorrufen. Jedoch können solche Prüfkörper schlecht einer Festigkeitsprüfung unterzogen werden. Da eine Schicht immer quer

zur Faser ausgerichtet ist und so eine geringere Festigkeit aufweist. Meist kommt es in dieser Schicht zum Bruch, bevor überhaupt die Festigkeitsgrenze des zu prüfenden Klebstoffes erreicht ist.

6.3 **Ergänzende Versuche:** Erkennung von künstlich erzeugten Delaminierungen an Brettschichtholz

In den ergänzenden Versuchen wurde die Ortung von Fehlverklebungen an BSH in realen Dimensionen untersucht. Dabei wurde exemplarisch mit verschiedensten zerstörungsfreien Messmethoden versucht, die Grenzen und Schwierigkeiten der Methoden aufzuzeigen. Insgesamt wurden drei verschiedene Fehlverklebungsstellen in die BSH-Prüfkörper eingebaut (A: durchgehende Fehlverklebungsstellen; B: Fehlverklebungsstellen die auf einer Seite im BSH-Träger enden und auf der anderen Seite bis nach aussen laufen; C: Fehlverklebungsstelle die im BSH liegen ohne Zugang zum Rand).

Alle drei Prüfkörper lassen die verschiedenen Fehlverklebungen anhand der Laufzeitunterschiede erkennen. Dabei bestehen jedoch deutliche Unterschiede hinsichtlich der fehlerfreien Detektion der Fehlverklebungen bzw. der korrekten Interpretation von Laufzeiterhöhungen. Teilweise treten messgerätspezifische Differenzen auf.

Wie die Vorversuche mit Sylvatest Duo zeigten, wiesen die Messergebnisse beim Einbringen des Ultraschall-Sender/Empfänger-Paares in die dafür vorgesehen Bohrungen bei konstantem Anpressdruck eine gute Reproduzierbarkeit auf. Der ausgegebene $\bar{x}$ der Schalllaufzeit schwankt um $\pm 1 \mu\text{s}$ ($n = 30$). Die ebenfalls ausgegebene Amplitude [mV] schwankt mit einem v von bis zu 8% scheinbar regellos und wurde in den nachfolgenden Messreihen nicht mehr mit erfasst. Ein blosses Aufsetzen des Ultraschall-Sender/Empfänger-Paares auf die Oberfläche, wie in früheren Untersuchungen (WEBER et al., [33]; ALTER [34]) ist aufgrund grosser Streuungen aller ausgegebenen Messdaten nicht zu empfehlen.

Bei dem Messgerät USH wurde die Reproduzierbarkeit der Messdaten in geringerem Umfang in der Konfiguration mit einem Sendesignal von 22 kHz und 4 Perioden Länge getestet. Bei der Auswertung der übrigen Konfigurationen zeigte sich jedoch,

dass es teilweise zu unregelmässigen, starken Schwankungen kam, die eine sinnvolle Auswertung nicht zulassen. Warum die Messwertschwankungen einzig bei der Konfiguration 22/4 in vertretbarem Rahmen blieben und mutmassliche "Ausreisser" selten waren, war nicht erkennbar. Nochmalige Tests im Anschluss an die Messungen zeigten, dass es sich empfiehlt, die Anzahl der einzelnen Messdurchgänge je Messpunkt, aus denen das USH Messsignal und Messgrössen berechnet wurden, deutlich zu erhöhen. Zur Klärung des beschriebenen Sachverhalts sollten weitere Versuche durchgeführt werden.

Bezüglich der Messergebnisse der verwendeten Messgeräte waren Unterschiede festzustellen. Die Schalllaufzeiten sowie -spannen waren bei Sylvatest Duo mit 124 - 145 μ s bzw. 11 - 21 μ s niedriger als bei USH (Sendesignal: 22 kHz, 4 Perioden) mit 126 - 168 μ s bzw. 27 - 39 μ s. Zieht man den unterschiedlichen Sender/Empfänger - Abstand (Sylvatest Duo = 19 cm, USH = 18 cm) in Betracht, vergrössert sich der Unterschied noch mehr. Somit bietet das USH mit seinem grösseren Abstand zwischen den Laufzeiten intakter und defekter Bereiche gegenüber dem Sylvatest Duo eine bessere Möglichkeit der Differenzierung. Die Ursachen hierfür können nicht klar benannt werden, da es sich bei Sylvatest Duo um ein "Black-Box-System" handelt. Parameter wie Form und Intensität des Sendesignals oder Filterung usw. waren nicht bekannt und somit nicht vergleichbar mit denen des USH.

Die in den Prüfkörpern vorhandenen Harzgallen und Äste zeigten im Rahmen der Versuche keinen messbaren Einfluss auf die Schalllaufzeit. Dies lag möglicherweise an deren relativ geringen Ausmassen. Zudem lagen diese in den meisten Fällen nicht direkt in der Messachse zwischen dem Ultraschall-Sender/Empfänger-Paar. Aufgrund der punktuellen Messung der Laufzeiten war es zur flächenhaften Abbildung der Prüfkörper notwendig, die Messdaten linear zu interpolieren. Dies führte, insbesondere bei stärkeren lokalen Schwankungen dazu, dass in den Randbereichen der Längsachsen das Vorhandensein weiterer Fehlverklebungen suggeriert wurde (Abbildung 61 bis Abbildung 64).

Bei Prüfkörper A (Abbildung 59 und Abbildung 60) hoben sich die Konturen der Fehlverklebungen anhand der Schalllaufzeiten klar von denen ihrer intakten Umgebung ab. Das relativ homogene Erscheinungsbild von intakten und unverklebten Flä-

chen sowie die deutlich unterscheidbaren Laufzeitspannen der verschiedenen Bereiche mit begrenztem Überschneidungsbereich ermöglichen eine gute Identifizierung der Fehlverklebungen. Die im Kapitel 5.3.1 erwähnte, zum Teil nur gering bzw. überhaupt nicht erhöhte Laufzeit innerhalb der Fehlverklebungen, wurde mit beiden Messgeräten in ähnlicher Weise erfasst. Daher erscheint ein Messfehler nicht plausibel. Möglicherweise wurde bei der Herstellung der Prüfkörper Klebstoff in diese Bereiche gedrückt. Wahrscheinlicher ist jedoch das Einbringen zu grosser Klebstoffmengen beim nachträglichen Ausfüllen der teilweise nicht vollkommen geschlossenen Nutenquerschnitte. Der teilweise im unteren Bereich aufgetretene optische Eindruck des "Auslaufens" der Fehlverklebungen über ihre Ränder hinweg beruht auf Messwerten im Überschneidungsbereich, welche nicht eindeutig einem Bereich zuzuordnen waren. Der starke Abfall der Laufzeit am linken Rand bzw. der Anstieg in den umliegenden Ecken von Prüfkörper A (Abbildung 60) beruhten auf einem als "Ausreisser" zu interpretierenden Einzelwert sowie den oben erwähnten Randeffekten infolge der linearen Interpolation der Messdaten.

Bei Prüfkörper B (Abbildung 61 und Abbildung 62) sind die Fehlverklebungen anhand der Schalllaufzeiten erkennbar, jedoch waren sie von ihrer intakten Umgebung erheblich schwerer zu differenzieren als bei den anderen Prüfkörpern. Die erhöhte Inhomogenität der Laufzeiten innerhalb der intakten Bereiche war nicht auf konkrete Ursachen zurückzuführen. Vergleicht man die Laufzeitspannen innerhalb der Fehlverklebungen mit den übrigen, waren keine, durch einen Übergangsbereich mehr oder weniger klar voneinander getrennte Bereiche erkennbar. Dies war auf Messwerte innerhalb der oberen Längsnut der rechten Fehlverklebung (Breite = 0.135 m; Sylvatest Duo, USH) sowie eines Messpunktes (Länge = 0.35 m, Breite = 0.025 m; USH) zurückzuführen (Abbildung 61 und Abbildung 62). Letzterer wurde aufgrund seines isolierten Charakters und der oben genannten unregelmässig starken Schwankungen beim Messgerät USH als "Ausreisser" interpretiert. Die Resultate innerhalb der oberen Längsnut können dagegen nicht als Messfehler betrachtet werden, da sie mehrere Messpunkte betreffen und diese von beiden Messgeräten in ähnlicher Weise erfasst wurden. Mangels markanter grosser Äste, deutlich abweichender Faserrichtung oder Jahrringlage usw. erscheinen holzbedingte Einflüsse als nicht ursächlich. Plausibler dagegen erscheint auch hier ein herstellungsbedingter Fehler. Aufgrund

des nur schmalen Streifens zwischen Nut und Aussenrand könnte der aufgetragene Klebstoff nicht ausgereicht haben, um die Nut vollständig, ohne grosse Blasenbildung, auszufüllen, was dann die Detektion dieser unplanmässigen Fehlverklebung durch höhere Schalllaufzeiten zur Folge hatte.

Der Grund für die, bei beiden Messgeräten, unvollständige Detektion der linken Fehlverklebung im oberen Abschnitt (Breite = 0.1075 m) besteht vermutlich im Verdücken von Klebstoff.

Bei Prüfkörper C (Abbildung 63 und Abbildung 64) waren im Bereich der Fehlverklebungen die Laufzeiten gegenüber der näheren Umgebung deutlich erhöht. Da sie jedoch nicht bzw. nur minimal über den Maximalwerten der intakten Abschnitte lagen, wird eine korrekte Interpretation der Laufzeitmuster erschwert.

Das Phänomen der erhöhten Laufzeiten im oberen Randbereich (Breite = 0.10 - 0.16 m) suggeriert das Vorhandensein einer grossflächigen Fehlverklebung. Da dies jedoch nicht der Fall war und auch systematische Messfehler und Ausreisser ausscheiden, war die Ursache dafür in den Holzeigenschaften zu suchen. Die in den Prüfkörpern vorhandenen Harzgallen und Äste zeigten, zumindest im Rahmen dieser Versuche, keinen messbaren Einfluss auf die Schalllaufzeit. Dagegen schien insbesondere die Jahrringlage einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Schalllaufzeit zu haben. Wie die Querschnittsflächen des Prüfkörpers (Abbildung 93 und Abbildung 94) belegen, weicht im betroffenen Bereich der Winkel α zwischen radial und tangential zunehmend von der idealen Jahrringlage ($\alpha = 90^\circ \pm 15^\circ$) ab und verringerten sich teilweise bis auf etwa 50° . CLAUSS et al. [35] gaben an, dass die Schallgeschwindigkeit bei $\alpha = 45^\circ$ ihr Minimum erreicht. Dies stützt die Annahme, dass die beschriebenen erhöhten Laufzeiten, welche Fehlverklebungen suggerieren, eine Folge der abweichenden Jahrringlage waren. Hinzu kam der Einfluss der Jahrringbreite. Die feinen Jahrringe gingen im betroffenen Bereich in zumeist grobe über, was nach BUCUR [36] ebenfalls eine Verringerung der Schallgeschwindigkeit zur Folge hat.

Die zu erwartenden Konturen der Fehlverklebungen wurden nur bedingt durch die Messergebnisse wieder abgebildet. Insbesondere die linke Fehlverklebung wies in Längsrichtung erst nach 5 cm eine Laufzeiterhöhung auf. Eine gegenüber den Prüfkörpern A und B vergrösserte Übergangszone der Fehlverklebung aufgrund der Ge-

ometrie und Lage im Randbereich erschien nicht plausibel. Daher wurde wiederum ein Verdrücken des Klebstoffes als Ursache vermutet.

6.4 Messung der chemischen und strukturellen Änderungen in gealterten Klebfugen (BFH AHB Biel) [31]

In Kooperation mit der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau in Biel wurden die drei verwendeten Klebstoffe PUR, PRF und MUF vor und nach der in Biel durchgeführten Delaminierungsprüfung an Fichten-BSH nach EN 301 und EN 302-2 chemisch analysiert. Die Untersuchungen wurden von Dr. Urs von Arx der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau, Forschung und Entwicklung, Werkstoffe und Holztechnologie durchgeführt. Weitere Ergebnisse in diesem Fachgebiet können im COST E53-Bericht [31] nachgeschlagen werden.

6.4.1 IR Spektroskopie

Für die Aufnahme der IR Spektren wurde die Methode der Attenuated Total Reflectance (ATR) IR Spectroscopy angewandt. Dabei ist zu beachten, dass die evaneszente Welle, die bei der Totalreflexion aus dem optisch dichteren Medium austritt und dabei in der Probe absorbiert wird, eine gewisse Eindringtiefe hat. Das bedeutet, dass die zu messende Schicht eine Dicke von mindestens dieser Eindringtiefe aufweisen muss. Ansonsten ist es möglich, dass auch die Absorption des hinter dem interessierenden Probenmaterial liegenden Stoffes (in unserem Fall Fichtenholz) mit gemessen wird. Deshalb wurden einerseits die Penetrationstiefen der IR Strahlung bei Totalreflexion als auch die Schichtdicken des Klebstoffes in den Laminaten berechnet bzw. mikroskopisch bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass für den mittleren IR Bereich eine Schichtdicke der Probe von 15 µm ausreichend ist. Diese Bedingung war bei den gemessenen Lamellen erfüllt.

Die drei geprüften Klebstoffe Purbond HB 181 (PUR), Prefere 4040 mit Prefere 5839 Härter (PRF) und Kauramin 683 mit Kauramin 688 Härter (MUF) wurden als reine gehärtete Klebstoffe vermessen. Es konnte gezeigt werden, dass jeder der drei Klebstoffe aufgrund von spezifischen Absorptionen eindeutig identifiziert werden kann. Der spezifische Informationsgehalt der IR Spektren nimmt von PUR nach PRF

nach MUF ab. MUF kann vor allem durch das Fehlen der spezifischen Absorptionsbanden von PUR, bzw. PRF von diesen unterschieden werden.

Die IR Absorption von Fichtenholz ist vor allem im Bereich von 1100 cm^{-1} bis 1000 cm^{-1} hoch. In diesem Bereich liegt jedoch keine spezifische Absorption eines der drei Klebstoffe. Falls die Klebstoffe durch Holzanteile verunreinigt sind, wäre eine Identifizierung trotzdem möglich.

Die IR-Spektren der reinen Klebstoffe sind mit den Spektren der aus den Lamellen präparierten Klebstoffschichten identisch. Die IR Absorption ist jedoch bei einigen Proben geringer.

Die IR Spektren der Klebstoffschichten vor und nach der Delaminationsprüfung sind bezüglich der IR-Absorptionslagen identisch. Die IR-Absorption ist jedoch nach der Prüfung geringer. Daraus ist zu folgern, dass die Klebstoffe durch die Bedingungen der Delaminationsprüfung nicht chemisch verändert oder abgebaut wurden.

6.4.2 MALDI TOF Massen-Spektroskopie

Es hat sich gezeigt, dass die MALDI TOF Methode für die Charakterisierung der ausgehärteten PUR, PRF und MUF Klebstoffe ungeeignet ist. Diese Klebstoffe sind sehr stark vernetzt und es ist deshalb mit der milden Ionisierungsmethode, wie sie in der MALDI Spektroskopie angewandt wird, kaum möglich, einzelne Polymer-Moleküle zu ionisieren und aus der Polymer-Matrix abzulösen. Die aufgenommenen MALDI Spektren zeigen vor allem die Signale der eingesetzten Ionisierungsmatrix DHB und wenige nicht charakteristische Peaks von sehr geringer Intensität.

6.4.3 Chemilumineszenz

An den Klebstoffen PUR, MUF und PRF wurden Chemilumineszenz-Temperatur Messungen durchgeführt. In Kurzzeitmessungen während 540 min mit einem Temperaturgradienten von 25°C bis 200°C wies PUR ab 90°C eine schwach ansteigende Chemilumineszenz auf die bei 160°C deutlich weiter anstieg, MUF zeigte erst ab 160°C eine deutlich ansteigende Chemilumineszenz, während PRF bis 200°C praktisch keine Chemolumineszenz aufwies. In isothermen Langzeitmessungen bei 80°C (831h) und 100°C (194h) wurde jedoch festgestellt, dass die Chemilumineszenz nach

wenigen Stunden auf weniger als 10 Counts/sec mg absinkt. Deshalb war eine kinetische Auswertung zum Langzeitverhalten der Klebstoffe mittels Chemilumineszenzmessungen nicht möglich. Es erscheint deshalb naheliegend, dass die Klebstoffe mit Stabilisatoren ausgerüstet sind, die als Radikalfänger agieren und eine Autokatalyse über Peroxyradikale und Hydroperoxide nicht in Gang kommt.

7 Schlussfolgerung Empfehlung für weiterführende Untersuchungen

In den Hauptversuchen konnte keine Änderung der Restfestigkeit der Klebfugen nach der Behandlung mit den verschiedenen Schnellalterungstests festgestellt werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass keine künstlichen Delaminierungen in den Klebfugen erzeugt werden konnte. Dies deckt sich mit Erfahrungen aus anderen Forschungen und der Praxis. Delaminierungen treten oft als Folge des Zusammenwirkens mehrerer Faktoren auf. Zu nennen sind hier ein zu geringer oder gar fehlender Klebstoffauftrag, zu geringe Presszeit, Abweichungen von der vorgeschriebenen Technologie wie eine zu geringe Luftfeuchte bei 1-K PUR, zu grosse Feuchtedifferenzen der Füge­teile und damit Auftreten von Eigenspannungen, zu geringe Presszeit oder zu geringer Pressdruck, zu niedrige Temperaturen oder Luftfeuchten beim Verkleben im Winter u.a.

Die Ergebnisse decken sich mit den Arbeiten anderer Einrichtungen wie der MPA Stuttgart. Auch dort wurde zum Beispiel im Glashaustest bei ordnungsgemässer Verklebung ein analoges Ergebnis erzielt. Man muss dabei auch berücksichtigen, dass die bauaufsichtlich zugelassenen Klebstoffe auf solche Anforderungen speziell ausgelegt werden. Insgesamt muss eingeschätzt werden, dass alle geprüften Schnellalterungstest, einschliesslich der industriell üblichen, nur in den wenigsten Fällen eine Delaminierung voraussagen können.

Auch Untersuchungen an der BFH AHB Biel konnten nur geringe Delaminierungen mit dem Delaminierungstest nach DIN EN 302-2 erzeugt werden. Diese lagen deutlich unter den zulässigen Werten. Auch hier ist zu berücksichtigen, dass zwischen Delaminierungstest nach DIN EN 302-2 und der Scherfestigkeitsprüfung mit verschiedenen Klimazyklen keine Korrelation besteht. In weiterführenden Forschungen

in Gebiet der Schnellalterung von Klebstoffen kann eine mechanische Beanspruchung der Klebfuge eine Möglichkeit darstellen in sehr kurzer Zeit Delaminierungen zu erzeugen. Dies kann z.B. durch zyklische mechanische Belastungen der Klebfuge erzielt werden. Zudem ist eine Optimierung der Prüfkörpergeometrie sinnvoll. Ob dies mit einer Vergrößerung der Holzquerschnitte ist, um grösser Schwind- und Quellsbewegungen zu erhalten oder durch kreuzweise Verklebung der Füge­teile wie im Kapitel 6.2 beschrieben geschieht, ist in weiteren Untersuchungen abzuklären. Bei der zerstörungsfreien Erkennung von Delaminierungen in Klebfugen, konnte bei den idealisierten Prüfkörpern geringer Dimension in den Vorversuchen gezeigt werden, dass eine Erkennbarkeit von Fehlverklebungen mittels Ultraschalllaufzeitmessung möglich ist. Durch die guten Eigenschaften der eingesetzten Klebstoffe in den Hauptversuchen, können dort keine Delaminierungen in den Prüfkörpern erzeugt werden und somit auch keine Delaminierungen in den Klebfugen erkannt werden.

Die Versuchsergebnisse zeigen sowohl bei den idealisierten Prüfkörpern geringer Dimension in den Vorversuchen als auch bei den Proben mit realitätsnahe­m Querschnitt in den ergänzenden Versuchen eine Erkennbarkeit von Fehlverklebungen mittels Ultraschalllaufzeitmessung. Bei den Prüfkörpern geringer Dimension in den Vorversuchen konnten die Fehlverklebungen weitgehend problemlos identifiziert werden. Zumeist zeigen die Messergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den realen Klebfugenverläufen. Aufgrund der geringen Dimension und der Fehlerfreiheit traten im Gegensatz zu den Proben mit realitätsnahe­m Querschnitt in den ergänzenden Versuchen keine nennenswerten, auf Holzeigenschaften beruhenden, Streuungen der Messwerte auf. Bei den idealisierten Proben konnte mittels exemplarischer Kombination zweier Prüfkörper-Varianten (C7/D9) gezeigt werden, dass mit Zunahme von Fehlverklebungen im selben Prüfkörperabschnitt die Schalllaufzeit deutlich zunimmt, was auch Untersuchungen von NIEMZ [37] belegen. Die in Kapitel 5.1 beschriebene Überlagerung zeigt, dass die Laufzeit mit jeder unverklebten Fuge um etwa denselben Betrag zunimmt. Somit erscheint es prinzipiell möglich, nicht nur intakte von defekten Klebfugen zu differenzieren, sondern auch die Anzahl vorhandener Fehlverklebungen zu unterscheiden, sofern sie von vergleichbarer Gestalt sind.

Allerdings weisen insbesondere die Messergebnisse des BSH-Prüfkörpers C in den ergänzenden Versuchen darauf hin, dass derzeit noch weiterer Untersuchungsbedarf

besteht, um Fehlinterpretationen in der Praxis zu vermeiden. Besonders die in realen Bauteilen anzutreffende Kombination verschiedenster Jahrringlagen bedeutet eine grosse Herausforderung. Dabei erschwert das im Holzleimbau zumeist eingesetzte Holz der Fichte aufgrund seiner ausgeprägten akustischen Anisotropie (RINGGER et al. [38]) eine klare Abgrenzung fehlverklebungsbedingter Laufzeiterhöhungen von den durch unterschiedliche Jahrringlagen verursachten Streuungen (TIITTA [39])⁵. Da es sich bei den untersuchten Prüfkörpern um relativ homogenes und zumeist fehlerfreies Material handelt, ist bei der Untersuchung realer Bauteile ein Anstieg der holzspezifischen Streuungen zu erwarten. Für weiterführende Untersuchungen wird daher empfohlen, den Einfluss sonstiger in der Praxis bedeutsamer Holzeigenschaften, wie Jahrringbreite, Astigkeit und Faserabweichungen, systematisch zu erfassen und voneinander abzugrenzen.

Da die Prüfkörper nicht in der höchstmöglichen Auflösung abgerastert wurden, um den Messaufwand in vertretbarer Grössenordnung zu halten, konnten die Grenzen der Fehlverklebungen parallel zur Prüfkörperlängsachse nicht in der maximal erreichbaren Schärfe abgebildet werden. Es empfiehlt sich bei zukünftigen Untersuchungen, auch - soweit technisch realisierbar - Messungen im unmittelbaren Randbereich vorzunehmen, um eine bessere Abbildung zu gewährleisten. Ein Messsystem, welches in der Lage ist den Prüfkörper kontinuierlich statt punktweise abzutasten wird empfohlen. Womöglich ist damit auch die Detektion kleinerer Holzfehler realisierbar.

Aufgrund der vielfältig genannten Einflussfaktoren auf die Schalllaufzeit können Aussagen nur anhand von Relativmessungen am jeweiligen Objekt getroffen werden. Dies hat den positiven Nebeneffekt, dass zeitlich veränderliche Randbedingungen, wie beispielsweise Temperatur und Holzfeuchte, in den meisten Anwendungsfällen nicht berücksichtigt werden müssen. Für das durchgeführte Vorhaben empfiehlt sich eine Nachuntersuchung, um die Versuchsergebnisse und deren Interpretation abzusichern. In Bezug auf die besonders interessanten Übergangszonen von intaktem Bereich zur Fehlverklebung bei allen Proben mit realitätsnahe Querschnitt bleiben

⁵ TIITTA et. al. berichten, dass die Laufzeit gegenüber anderen Ultraschall-Signalparametern am wenigsten vom Jahrringwinkel beeinflusst wird. Allerdings ist diese Aussage nicht direkt übertragbar, da das Untersuchungsmaterial aus Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) bestand und holzartenspezifische Unterschiede nicht auszuschliessen sind.

zum Teil Unstimmigkeiten bestehen. Um diese auszuräumen und die oben diskutierten möglichen Ursachen zu überprüfen, wären die entsprechenden Klebfugen freizulegen. Sollte zum aktuellen Zeitpunkt eine Zerstörung der Prüfkörper nicht erwünscht sein, könnten hilfsweise mittels Röntgentomographie oder ähnlichen geeigneten Verfahren die wahre Gestalt der Fehlverklebungen und der Klebstoffverteilung ermittelt werden. Sollte sich hierbei zeigen, dass die Fehlverklebungen mit der angewendeten Methode nicht sauber vom übrigen Bereich abgegrenzt werden konnten, wären weitere Versuche zur Lösung dieses Problems durchzuführen. Möglicherweise könnte das Einbringen schmaler elastischer und kompressibler Dichtbänder im Grenzbereich zu besseren Ergebnissen führen.

Erweisen sich die diskutierten Ursachen für die Unstimmigkeiten in den Übergangs- und Randzonen als zutreffend, bestätigt dies die Erkennbarkeit von Fehlverklebungen ab Kantenlängen von etwa 5 cm. Im Rahmen des Vorhabens konnten Fehlverklebungen zweidimensional abgebildet werden. Da es jedoch, beispielsweise für Erhaltungsmassnahmen erforderlich sein kann, die detektierte Delaminierung einer bestimmten Klebfuge zuzuordnen, ist eine dahingehende Optimierung des Messverfahrens anzustreben. Als erfolgversprechende Alternative bietet sich das Ultraschall-Impuls/Echo-Verfahren an. Das im Stahl- und Betonbau seit langem bewährte Messverfahren kam in der jüngeren Vergangenheit bei ähnlichen Fragestellungen auch bei Holz zum Einsatz (HASENSTAB et al. [40]; DILL-LANGER et al., [41]) und bietet gegenüber der üblichen Transmissionstechnik verschiedene Vorteile. Zum einen ermöglicht das, auf der Schallreflektion an Grenzflächen basierende, Impuls/Echo-Verfahren die Lokalisierung der Fehlstelle auch dreidimensional, zum anderen muss für eine Untersuchung nur eine Bauteilseite zugänglich sein. Zudem bietet der Einsatz von Transversalwellen eine mögliche Lösung für das oben genannte Problem grösser, durch unterschiedliche Jahrringlagen verursachter Streuungen. Nach HASENSTAB (2006) ist der Einfluss der Holz Anatomie auf die Schallgeschwindigkeiten von Transversalwellen weniger ausgeprägt als bei Longitudinalwellen.

Um grössere und kleinere Defekte erfolgreich detektieren zu können, erscheint eine Kombination der folgenden Verfahren und Techniken sinnvoll:

- Transmissions- und Impuls/Echo-Messungen
- Longitudinal- und Transversalwellen
- kontinuierliche statt punktweserMessung
- senkrechte und schräge Einstrahlung
- Nutzung weiterer Ultraschall-Signalparameter
- Verwendung anderer Frequenzbereiche

Des weiteren ist die Entwicklung leistungsstarker Verfahren auf Basis luftgekoppelter Ultraschalltechniken zur Qualitätskontrolle von Holz und Holzprodukten von hoher praktischer Relevanz. Die Entwicklung leistungsfähiger luftgekoppelter Ultraschall-Messtechnik erweitert dabei gegenüber konventionellen Ultraschall-Verfahren das Anwendungsfeld, beispielsweise um Online-Messungen im Produktionsprozess (TOMPPPO et al. [42]). Untersuchungen von STÖSSEL [43] zeigen, dass eine Detektion von Defekten (Bohrlöcher und Äste) sowie Fehlverklebungen von Furnier mittels luftgekoppelter Ultraschalltechniken möglich ist. Insbesondere zur Erkennung von Fehlverklebungen bzw. alterungsbedingten Delaminierungen werden derzeit Forschungsarbeiten an der EMPA durchgeführt.⁶

⁶ Die Forschungsarbeiten an der EMPA erfolgen durch das Departement Informations-, Zuverlässigkeits- und Simulationstechnik (Abteilung Elektronik/Messtechnik/Zuverlässigkeit; Dr. Neuschwander). Die Untersuchungen werden durch Herrn Sanabria im Rahmen seiner Dissertation zu Ultraschall mit berührungsloser Ankopplung durchgeführt.

8 Verzeichnisse

8.1 Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbaus von Holz. (Quelle: Diss. J. Harrington).....	9
Abbildung 2: Schematische Darstellung des mikroskopischen Aufbaus von Nadelholz (links) und Laubholz (rechts) (Quelle: Das grosse Buch vom Holz; Martyn Branwell).....	11
Abbildung 3: Fugenöffnung und Delaminierung in Parkett bei Fussbodenheizung (BLUMER [4]).....	12
Abbildung 4: Berechnete Verformung von Parkett als Funktion der Jahrringlage (BLUMER [4]). Dabei ist die radiale Jahrringlage 90° und die tangentielle 0°.	13
Abbildung 5: Festigkeit einer Klebung nach HABENICHT [8]	15
Abbildung 6: Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Aushärtungsmechanismus. (Brockmann et. al. [16]).....	19
Abbildung 7: Unterscheidung der Polyurethanklebstoffe nach MEIER-WESTHUES [18].....	22
Abbildung 8: Polyaddition von 2K-PUR (WEISS et al. [19])	22
Abbildung 9: Polyaddition von 1K-PUR (WEISS et al. [19])	23
Abbildung 10: Aufbau der Prüfkörper-Varianten A-D	28
Abbildung 11: Versuchsaufbau PCUS 10NF.....	29
Abbildung 12: Abtastschemata der Prüfkörper-Varianten	30
Abbildung 13: Aufbau der Prüfkörper-Kombination C7/D9	30
Abbildung 14: Bewitterungsstand auf dem Dach des HIF-Gebäudes der ETH Zürich.	32
Abbildung 15: Anlage zur künstlichen Bewitterung an der AHB in Biel (Q-SUN 3100 Xenon Test Chamber der Firma Q-Panel LAB Products).	33

Abbildung 16: Krümmung der Probenbretter im Bewitterungsschrank Q-SUN 3100 Xenon Tast Chamber der Firma Q-Panel LAB Products. Durch diese Krümmung hob sich der Deckel des Bewitterungsschranks ab und die Maschine schaltete sich aus.....	34
Abbildung 17: Teilung der Probenbretter der künstlichen Bewitterung, um die Krümmung zu verkleinern	35
Abbildung 18: Schallgeschwindigkeitsmessgerät Epoch XT der Firma Olympus....	37
Abbildung 19: Schema der Longitudinalwelle nach Olympus []	37
Abbildung 20: Spannvorrichtung für Sender- Empfängerschallköpfe.	38
Abbildung 21: Messköpfe für Longitudinalwellen der Firma Panametrics.	38
Abbildung 22: Versuchsaufbau Eigenfrequenzmessung	39
Abbildung 23: Lösung für die erste Biegeschwingung. In x-Richtung ist die Länge des Körpers, in y-Richtung die Auslenkung aufgetragen.	40
Abbildung 24: Konstellation nach Görlacher []	40
Abbildung 25: Zugscherproben nach der DIN EN 302-1. Alle Angaben in Millimeter.....	41
Abbildung 26: Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z010.	42
Abbildung 27: Dehnungsaufnahme mittels induktivem Wegaufnehmer zur Bestimmung der Klebfugendehnung.....	42
Abbildung 28: Kamera zur Aufzeichnung von Spannungsverteilungen bei Zugscherproben der Firma LIMES mit dem Objektiv AF NIKKOR 28-105mm, 1:3.5-4.5 D.....	44
Abbildung 29: Möglichst fein und zufällig angeordnetes Punktmuster für die Analyse der Spannungsverteilung auf der Schmalseite einer Zugscherprobe mit der Software Vic 2D der Firma LIMES.....	44
Abbildung 30: Aufbau der Ultraschall-Brettschichtholzbalken A, B, C	45
Abbildung 31: Abtastschemata der Prüfkörper-Varianten	47
Abbildung 32: Versuchsaufbau Sylvatest Duo	47
Abbildung 33: Versuchsaufbau USH	49
Abbildung 34: Messaufbau für „Wood pole Tester“ der japanischen Firma Fujikura. Messung in x Richtung. Alle Angaben sind in Millimeter	49
Abbildung 35: Messaufbau und Messschema für Messungen mit PiCUS Hardware 2.0	50

Abbildung 36: Messschema für eine elektrische Impedanzmessung mit dem Gerät Treetronic Hardware an Bäumen	51
Abbildung 37: Messaufbau für eine elektrische Impedanzmessung mit dem Gerät Treetronic.	51
Abbildung 38: Schalllaufzeit Prüfkörper A2 bei 10 mm Dicke	52
Abbildung 39: Schalllaufzeit Prüfkörper C10 bei 10 mm Dicke	53
Abbildung 40: Schalllaufzeit Prüfkörper D9 bei 10 mm Dicke	53
Abbildung 41: Schalllaufzeit Prüfkörper-Kombination C7/D9 bei 20 mm Dicke.....	54
Abbildung 42: Holzfeuchte der verwendeten zwei Holzarten Buche und Fichte.	55
Abbildung 43: Dichte bei Normalklima (20°C/65% rLF) der verwendeten zwei Holzarten Buche und Fichte.....	55
Abbildung 44: Verlauf der Änderung der Schalllaufzeit mit Zunahme der Zyklenzahl. Dabei wurden die Probenbretter vor den jeweiligen Schnellalterungstest und nach der Behandlung gemessen und die Laufzeitänderungen auf der y-Achse der Diagramme aufgetragen. ..	57
Abbildung 45: Ergebnisse der Eigenfrequenzmessung nach der Schnellalterung der Klebfuge. Dabei wurde eine Messung der Eigenfrequenz vor und eine nach der Behandlung mit den Schnellalterungstest vorgenommen und die Änderung Hertzzahl in den Diagrammen abgebildet.....	59
Abbildung 46: Boxplot der Restfestigkeit nach einer natürlichen Bewitterung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.....	62
Abbildung 47: Boxplot der Restfestigkeit nach einer künstlichen Bewitterung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.....	63
Abbildung 48: Boxplot der Restfestigkeit nach einer Wechselklimalagerung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.....	64
Abbildung 49: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz, verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem ersten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.....	67

Abbildung 50: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz ,verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem zweiten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.	67
Abbildung 51: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz, verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem dritten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.	68
Abbildung 52: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz, verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem vierten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.	68
Abbildung 53: Spannungszustand bei Zugscherproben kurz vor dem Bruch. Es handelt sich um Proben aus Buchenholz ,verklebt mit MUF-Klebstoff, die nach dem letzten Wechselklimazyklus nach Kapitel 4.6.2.1 geprüft wurden. Die linke Abbildung zeigt den Spannungszustand einer Probe aus dem Randbereich des Probenbrettes und die rechte Abbildung aus der Mitte des Probenbrettes.	68
Abbildung 54: Verlauf der Änderung der Zugscherfestigkeit mit Zunahme der Behandlungsdauer als Indiz für den Delaminierungsgrad der Klebfuge ausgelöst durch die drei verschiedenen Schnellalterungstests.	70
Abbildung 55: Vergleich der Ergebnisse der Änderung der Schalllaufzeit auf der y-Achse und der Zugscherfestigkeit auf der x-Achse. Die Resultate stammen vom Schnellalterungstest der natürlichen Bewitterung. Die grüne Linie ist der lineare Trend der Buchenproben, die blaue Linie zeigt den Trend der Fichtenproben.....	73
Abbildung 56: Vergleich der Ergebnisse der Änderung der Schalllaufzeit auf der y-Achse und der Zugscherfestigkeit auf der x-Achse. Die Resultate stammen vom Schnellalterungstest der künstliche Bewitterung. Die grüne Linie ist der lineare Trend der Buchenproben, die blaue Linie zeigt den Trend der Fichtenproben.....	74

Abbildung 57: Vergleich der Ergebnisse der Änderung der Schalllaufzeit auf der y-Achse und der Zugscherfestigkeit auf der x-Achse. Die Resultate stammen vom Schnellalterungstest der Wechselklimalagerung. Die grüne Linie ist der lineare Trend der Buchenproben, die blaue Linie zeigt den Trend der Fichtenproben.	75
Abbildung 58: Korrelation der Ergebnisse der Änderung der Eigenfrequenz auf der y-Achse und der Zugscherfestigkeit auf der x-Achse. Im oberen Diagramm ist die Korrelation der Ergebnisse aus dem Schnellalterungstest der natürlichen Bewitterung aufgezeigt, im unteren Diagramm die der Wechselklimalagerung. Die grüne Linie zeigt die Trendlinie der Buchenproben, die blaue Linie zeigt den Trend der Fichtenproben.	77
Abbildung 59: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH A bei 210 mm Dicke (Sylvatest)	80
Abbildung 60: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH A bei 210 mm Dicke (USH).....	80
Abbildung 61: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH B bei 210 mm Dicke (Sylvatest)	81
Abbildung 62: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH B bei 210 mm Dicke (USH).....	81
Abbildung 63: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH C bei 210 mm Dicke (Sylvatest)	82
Abbildung 64: Schalllaufzeit Prüfkörper BSH C bei 210 mm Dicke (USH).....	82
Abbildung 65: Das Diagramm zeigt die Ergebnisse der Laufzeit in x-Richtung mit dem Messgerät Wood Pole Tester.	82
Abbildung 66: Das Diagramm zeigt die Laufzeiten in y Richtung (entlang der Klebfuge).	83
Abbildung 67: Visuell dargestellt die Ergebnisse der Untersuchungen mit PiCUS Hardware 2.0 an Brettschichtholz mit eingebauten Fehlverklebungen. Die rote Linie zeigt die Position der Fehlverklebung.	83
Abbildung 68: Screenshot des Oszilloskopes bei einer elektrischen Impedanzmessung. Grünes Rechtecksignal angelegte Spannung. Blaues Signal Spannungsmessung.	85
Abbildung 69: Boxplot der Änderung der Schalllaufzeit nach einer natürlichen Bewitterung. Dabei ist der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.....	IV
Abbildung 70: Boxplot der Änderung der Schalllaufzeit nach einer künstlichen Bewitterung. Dabei ist der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.....	V
Abbildung 71: Boxplot der Änderung der Schalllaufzeit nach einer Wechselklimalagerung. Dabei ist der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.....	VI

Abbildung 72: Boxplot der Dehnung bei Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.	XV
Abbildung 73: Boxplot der Dehnung bei Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.	XVI
Abbildung 74: Boxplot der Dehnung bei Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.	XVII
Abbildung 75: Einstellungen bei der Messung mit den Ultraschallgerät PCUS	XXVIII
Abbildung 76: Schalllaufzeit Prüfkörper A2 bei 10 mm Dicke	XXXI
Abbildung 77: Schalllaufzeit Prüfkörper A4 bei 10 mm Dicke	XXXI
Abbildung 78: Schalllaufzeit Prüfkörper A12 bei 10 mm Dicke	XXXI
Abbildung 79: Schalllaufzeit Prüfkörper B1 bei 10 mm Dicke.....	XXXI
Abbildung 80: Schalllaufzeit Prüfkörper B4 bei 10 mm Dicke.....	XXXII
Abbildung 81: Schalllaufzeit Prüfkörper B5 bei 10 mm Dicke.....	XXXII
Abbildung 82: Schalllaufzeit Prüfkörper C6 bei 10 mm Dicke.....	XXXII
Abbildung 83: Schalllaufzeit Prüfkörper C7 bei 10 mm Dicke.....	XXXII
Abbildung 84: Schalllaufzeit Prüfkörper C8 bei 10 mm Dicke.....	XXXIII
Abbildung 85: Schalllaufzeit Prüfkörper C10 bei 10 mm Dicke.....	XXXIII
Abbildung 86: Schalllaufzeit Prüfkörper C11 bei 10 mm Dicke.....	XXXIII
Abbildung 87: Schalllaufzeit Prüfkörper D8 bei 10 mm Dicke	XXXIII
Abbildung 88: Schalllaufzeit Prüfkörper D9 bei 10 mm Dicke	XXXIV
Abbildung 89: Schalllaufzeit Prüfkörper D10 bei 10 mm Dicke	XXXIV
Abbildung 90: Schalllaufzeit Prüfkörper D11 bei 10 mm Dicke	XXXIV
Abbildung 91: Schalllaufzeit Prüfkörper D12 bei 10 mm Dicke	XXXIV
Abbildung 92: Schalllaufzeit Prüfkörper-Kombination C7/D9 bei 20 mm Dicke	XXXV

Abbildung 93: Prüfkörper A, Querschnitt links	XXXVI
Abbildung 94: Prüfkörper A, Querschnitt rechts	XXXVI

8.2 Tabellen

Tabelle 1: Beschreibung der einzelnen Gruppen in der „Equation of Performance“ nach Marra in DUNKY und NIEMZ [9].....	18
Tabelle 2: Schubmodule von Klebstoffen nach CLAD [].	20
Tabelle 3: Übersicht der Kenndaten der verwendeten Hölzer (KUCERA et. al. [21]):	25
Tabelle 4: Verwendete Klebstoffe und ihre Verarbeitungsparameter.....	26
Tabelle 5: Bewitterungszyklus für die künstliche Bewitterung in Anlehnung an die DIN EN 927-6	34
Tabelle 6: Programm für das Wechselklima der Versuchsreihe Delaminierung..	35
Tabelle 7: Laufzeitspannen der verschiedenen Prüfkörper-Bereiche. Dabei besitzt Prüfkörper (PK) A eine durchgehende Fehlverklebungsstellen (FV), PK B Fehlverklebungsstellen die auf einer Seite im BSH-Träger enden und auf der anderen Seite bis nach aussen laufen und der PK C besitzt Fehlverklebungen die im BSH liegen ohne Zugang zum Rand.	79
Tabelle 8: Laufzeitänderung bei der Durchschallung der Probenbretter nach dem Einfluss einer natürlichen Bewitterung auf die Klebfuge.	I
Tabelle 9: Laufzeitänderung bei der Durchschallung der Probenbretter nach dem Einfluss einer künstlichen Bewitterung auf die Klebfuge.....	II
Tabelle 10: Laufzeitänderung bei der Durchschallung der Probenbretter nach dem Einfluss einer Wechselklimalagerung auf die Klebfuge.	III
Tabelle 11: Änderung der Eigenfrequenz der Probenbretter nach dem Einfluss einer natürlichen Bewitterung. Die relative Änderung der Frequenz ist auf die ermittelte Eigenfrequenz vor der Behandlung bezogen.	VII
Tabelle 12: Änderung der Eigenfrequenz der Probenbretter nach dem Einfluss einer Wechselklimalagerung (feucht/trocken). Die relative Änderung der Frequenz ist auf die ermittelte Eigenfrequenz vor der Behandlung bezogen.....	VIII
Tabelle 13: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	IX
Tabelle 14: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	X

Tabelle 15: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XI
Tabelle 16: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Fichte-Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XII
Tabelle 17: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XIII
Tabelle 18: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XIV
Tabelle 19: Dehnung der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XVIII
Tabelle 20: Dehnung der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XIX
Tabelle 21: Dehnung der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XX
Tabelle 22: Dehnung der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XXI
Tabelle 23: Dehnung der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XXII
Tabelle 24: Dehnung der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung mit Hilfe eines Zugscherversuches.	XXIII
Tabelle 25: Holzbruchanteil von Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung.	XXIV
Tabelle 26: Holzbruchanteil von Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung.	XXV
Tabelle 27: Holzbruchanteil von Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung.	XXVI
Tabelle 28: Angaben zur Korrelation zwischen der Restfestigkeit und der Schalllaufzeitänderung.	XXVII
Tabelle 29: Position der Holzfehler bei dem BSH	XXIX

8.3 Formeln

Formel 1	26
Formel 2	27
Formel 3	43
Formel 4	43

8.4 Literatur

-
- [1] Wagenführ A., Scholz F., Taschenbuch der Holztechnik, Carl Hanser Verlag, Fachbuchverlag Leipzig, 2007.
 - [2] Lohmann U., *Holzlexikon*, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, Bd. 2, 4 Auflage, 2003.
 - [3] Gereke T., Moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels, in: ders., *Dissertation*, ETH Zürich, Holzphysik, Zürich, 2009.
 - [4] Blumer S., Moisture induced stresses and deformations in parquet floors - An Experimental and Numerical Study, in: ders., *Diplomarbeit*, ETH Zürich, Zürich, 2006.
 - [5] Dill-Langer G., Aicher S., Bernauer W., »Reflection measurements at timber gluelines by means of ultrasound shear waves«, *Otto-Graf-Journal*, Bd. 2005, Nr. 16, S. 273-284, 2005.
 - [6] Hanhijärvi, A., Modelling of creep deformation mechanism in wood, in: ders., *Dissertation*, Technical research Centre of Finland, Espoo, 1995.
 - [7] Rothweiler D., Einfluss der Temperatur auf die Zugscherfestigkeit von Holzverbindungen, in: ders., *Bachelorarbeit*, ETH Zürich, Zürich, FS 2009, 2009.
 - [8] Habenicht G., (Hrsg.), Kleben. Grundlagen, Technologie, Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin, 5 Auflage, S. 1082, 1986.
 - [9] Dunky M., Niemz P., Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren, Springer, Berlin, 2002.
 - [10] Kratzert, Ibold, Herstellung von Kunststoffen. Didaktik der Chemie, FU Berlin, <<http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/synthese.htm>>, in: 27.5.09, 2000.

-
- [11] Wittchen B., Josten E., Reiche T., (Hrsg.), Holzfachkunde. Für Tischler/Schreiner und Holzmechaniker, Teubner, Wiesbaden, 4., vollst. überarb. und aktual. Aufl Auflage, 2006.
- [12] Clad W., Über das Wesen einer Verklebung und die Fugenelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen, in: ders., *Dissertation*, TH Stuttgart, Stuttgart, 1964.
- [13] Bundesamt für Gesundheit, Formaldehyd in der Innenraumluft: Informationen und Tipps für Verbraucher, <<http://www.bag.admin.ch/~themen/chemikalien/00228/05381/index.html?lang=de&download=M3wBUQCu/8ulmKDu36WenojQ1NTTjaXZnqWfVpzLhmfhnapmmc7Zi6rZnqCkkId1fnyDbKbXrZ2lhtTN34al3p6YrY7P1oah162apo3X1cjYh2+hoJVn6w==>>, in: 21.5.09, 2008.
- [14] Müller B., Rath W., Formulierung von Kleb- und Dichtstoffen: Das kompetente Lehrbuch für Studium und Praxis, Vincentz Network, Hannover, 290, 2004.
- [15] Schmaus J., Kolbinger A., Kress G., Neukum M., Winkelhofer P., Holztechnik, Lehrfeld 5 bis 12, Bildungsverlag EINS, Troisdorf, S. 280, 2007.
- [16] Brockmann, Walter (Hrsg.), Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.
- [17] Wagenführ A., Scholz F., Taschenbuch der Holztechnik, Carl Hanser Verlag, Fachbuchverlag Leipzig, 2007.
- [18] Meier-Westhues, Ulrich, Polyurethane. Lacke, Kleb- und Dichtstoffe, Vincentz Network, Hannover, S. 348, 2007.
- [19] Weiss, Haiger, Jäger, Reaktionsmechanismen von Klebstoffsystemen, <http://www.weiss-chemie.de/html/pdf/pdf_6/xti_reak.pdf >, in: 27.5.09, 2002.
- [20] Schmidheiny R., Polyurethanchemie, prochem AG, <www.prochem.ch/html/~forum/purchem.pdf >, in: 27.5.09, 2000.
- [21] Kucera L.J., Gfeller B., Einheimische und Fremdländische Nutzhölzer, Professur Holzwissenschaften Eidgenössische Technische Hochschule Zürich/Schweizerische Ingenieur- und Technikerschule für die Holzwirtschaft Biel, 1994
- [22] Wagenführ R., Holzatlas, Fachbuchverlag Leipzig, 1996, S.361
- [23] Hasenstab A. G. M., Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren, in: ders., *Dissertation*, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2006.

-
- [24] Aicher S., Dill-Langer G., Ringger T., »Non-destructive detection of longitudinal cracks in glulam beams«, *Otto-Graf-Journal*, Bd. 2002, Nr. 13, S. 165-182, 2002.
- [25] Merz T., Messung der Schallgeschwindigkeit in den drei Hauptrichtungen mit Longitudinal- und Transversalwellen, in: ders., *Bachelorarbeit*, ETH Zürich, Zürich, FS 2009, 2009.
- [26] Sonderegger W., Alter P., Niemz P., »Untersuchungen zu ausgewählten Eigenschaften von Fichtenklangholz aus Graubünden«, *Holz als Roh- und Werkstoffe*, Bd. 2008, Nr. 66, S. 345-354, 2008.
- [27] Niemz P., *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, DEW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 1993.
- [28] Wanninger F., Ermittlung spezieller Holzeigenschaften mit Ultraschall und Eigenfrequenzmessung, in: ders., *Bachelorarbeit*, ETH Zürich, Zürich, FS 2008, 2008.
- [29] Görlacher R., »Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz«, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd. 1984, Nr. 42, S. 219-222, 1984.
- [30] Caprez A., Untersuchungen zum Einfluss der Wechselklimalagerung auf die Scherfestigkeit von verklebtem Holz, in: ders., *Bachelorarbeit*, ETH Zürich, Zürich, FS 2009, 2009.
- [31] Schnider T., Hering S., Niemz P., von Arx U., Untersuchungen zum Mechanismus des Versagens von Klebfugen unter Langzeitbeanspruchung und deren Früherkennung, in: ders., *Quality Control for Wood and Wood Products*, ETH Zürich und BFH AHB Biel, Zürich und Biel, 2010.
- [32] Schnider T., Hering S., Niemz P., von Arx U., Untersuchungen zum Mechanismus des Versagens von Klebfugen unter Langzeitbeanspruchung und deren Früherkennung, in: ders., *Quality Control for Wood and Wood Products*, ETH Zürich und BFH AHB Biel, Zürich und Biel, 2010.
- [33] Weber R., Bächle F., Untersuchungen zur Erkennung von Defekten in Vollholzverklebungen mittels Ultraschall, in: ders., *Interner Bericht*, ETH Zürich, Zürich, ETHZ/IfB-HP Nr. 38, 2007.
- [34] Alter P., Untersuchungen zur Erkennung von Defekten in Vollholzverklebungen mittels Ultraschall (2) sowie Untersuchungen über Eindringverhalten verschiedener Prepolymere, in: ders., *Interner Bericht*, ETH Zürich, Zürich, ETHZ/IfB-HP Nr. 41, 2007.
- [35] Clauss S., Bächle F., Niemz P., »Experimentelle Untersuchungen zur radialen Durchschallung von Stämmen mittels variabler Frequenz«, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd. 2005, Nr. 16, S. 273-284, 2007.

-
- [36] Bucur S., *Acoustics of Wood*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [37] Niemz P., »Bestimmung von Fehlverklebungen mittels Schalllaufzeitmessung«, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd. 1995, Nr. 53, 1995.
- [38] Ringger T., Höfflin L., Dill-Langer G., Aicher S., »Measurements on the acoustic anisotropy of soft and hard wood; Effects on source location«, *Otto-Graf-Journal*, Bd. 2003, Nr. 14, S. 231-253, 2003.
- [39] Tiitta M., Beall F.C., Biernacki J.M., »Acousto-Ultrasonic Assessment of Internal Decay in Glulam Beams«, *Wood and Fiber Science*, Bd. 1998, Nr. 3, Juli, S. 259-272, 1998.
- [40] Hasenstab A. G. M., Krause M., Hillemeier B., Rieck C., »Ultraschall-echo-Messungen an Holz«, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd. 2006, Nr. 64, S. 475-481, 2006.
- [41] Dill-Langer G., Aicher S., Bernauer W., »Reflection measurements at timber gluelines by means of ultrasound shear waves«, *Otto-Graf-Journal*, Bd. 2005, Nr. 16, S. 273-284, 2005.
- [42] Tomppo L., Tiitta M., Lappalainen R., »Ultrasound evaluation of lathe check depth in birch veneer«, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd. 2008, Nr. DOI 10.1007/s00107-008-0276-y, 2008.
- [43] Stössel R., *Air-coupled ultrasound inspection as a new non-destructive testing tool for quality assurance*, in: ders., *Dissertation*, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Universität Stuttgart, 1998.

Anhang A: Laufzeitänderung bei Durchschallung

Tabelle 8: Laufzeitänderung bei der Durchschallung der Probenbretter nach dem Einfluss einer natürlichen Bewitterung auf die Klebfuge.

Zykluszahl	Klebstoff	Mittelwert [us]	Standardabweichung [us]	Varianationskoeffizient		Mittelwert [us]	Standardabweichung [us]	Varianationskoeffizient
		<i>Buche</i>				<i>Fichte</i>		
1	PUR	0.15	0.15	101%		-0.24	0.35	144%
	MUF	0.12	0.13	113%		-0.83	0.59	71%
	PRF	0.12	0.08	70%		-0.59	0.40	68%
	Vollholz	0.16	0.05	31%		-0.31	0.35	113%
2	PUR	0.07	0.14	202%		-0.11	0.49	451%
	MUF	0.16	0.07	45%		-0.80	0.49	61%
	PRF	0.23	0.07	30%		0.00	0.02	843%
	Vollholz	0.15	0.32	209%		-0.74	0.71	96%
3	PUR	0.14	0.07	49%		-0.51	0.78	154%
	MUF	0.09	0.04	45%		-0.09	0.20	227%
	PRF	0.09	0.07	70%		-0.33	0.35	106%
	Vollholz	0.14	0.28	203%		-0.08	0.38	510%
4	PUR	0.39	0.14	35%		0.19	0.38	205%
	MUF	0.06	0.09	150%		0.10	0.16	170%
	PRF	0.21	0.16	78%		-0.31	0.50	161%
	Vollholz	0.19	0.21	113%		-0.34	0.66	196%
5	PUR	0.34	0.08	25%		-0.03	0.11	399%
	MUF	0.27	0.19	70%		-0.41	0.77	186%
	PRF	0.20	0.11	56%		0.10	0.14	145%
	Vollholz	0.14	0.36	261%		0.09	0.43	480%

Tabelle 9: Laufzeitänderung bei der Durchschallung der Probenbretter nach dem Einfluss einer künstlichen Bewitterung auf die Klebfuge.

Zykluszahl	Klebstoff	Mittelwert [us]	Standardabweichung [us]	Varianationskoeffizient		Mittelwert [us]	Standardabweichung [us]	Varianationskoeffizient
		<i>Buche</i>				<i>Fichte</i>		
2	PUR	-0.01	0.03	352%		0.12	0.35	291%
	MUF	0.10	0.05	51%		0.10	0.08	78%
	PRF	0.26	0.14	57%		0.10	0.06	60%
	Vollholz	0.19	0.17	87%		-0.01	0.03	329%
4	PUR	0.27	0.13	49%		0.21	0.15	70%
	MUF	0.24	0.17	70%		0.16	0.15	95%
	PRF	0.19	0.16	89%		0.26	0.22	83%
	Vollholz	0.34	0.14	43%		-0.19	0.57	299%
6	PUR	0.15	0.10	66%		0.19	0.29	158%
	MUF	-0.02	0.04	276%		0.26	0.34	129%
	PRF	0.12	0.11	88%		0.16	0.09	54%
	Vollholz	0.30	0.19	62%		-0.12	0.67	558%
8	PUR	0.05	0.08	168%		0.17	0.06	35%
	MUF	0.14	0.13	90%		0.25	0.35	138%
	PRF	0.23	0.26	112%		0.15	0.19	128%
	Vollholz	0.49	0.34	69%		0.12	0.19	161%
10	PUR	0.14	0.11	76%		0.09	0.10	112%
	MUF	0.10	0.10	94%		0.22	0.59	270%
	PRF	0.08	0.19	240%		0.26	0.06	23%
	Vollholz	0.23	0.16	71%		-0.58	0.65	112%

Tabelle 10: Laufzeitänderung bei der Durchschallung der Probenbretter nach dem Einfluss einer Wechselklimalagerung auf die Klebfuge.

Zykluszahl	Klebstoff	Mittelwert [us]	Standardabweichung [us]	Varianationskoeffizient		Mittelwert [us]	Standardabweichung [us]	Varianationskoeffizient
		<i>Buche</i>				<i>Fichte</i>		
4	PUR	0.21	0.05	25%		0.23	0.58	255%
	MUF	0.25	0.13	52%		0.10	0.22	207%
	PRF	0.24	0.15	63%		0.27	0.43	160%
	Vollholz	0.23	0.07	31%		-0.30	0.76	250%
8	PUR	0.28	0.05	18%		-0.19	0.66	347%
	MUF	0.26	0.02	9%		0.17	0.04	21%
	PRF	0.28	0.04	14%		0.14	0.21	148%
	Vollholz	0.27	0.02	8%		0.17	0.27	155%
12	PUR	0.34	0.05	13%		0.16	0.29	177%
	MUF	0.25	0.04	16%		-0.48	0.56	117%
	PRF	0.29	0.03	9%		-0.86	0.81	95%
	Vollholz	0.30	0.02	8%		0.30	0.68	227%
16	PUR	0.33	0.03	8%		-0.51	0.61	119%
	MUF	0.29	0.04	15%		0.42	0.18	43%
	PRF	0.37	0.13	35%		0.15	0.35	230%
	Vollholz	0.37	0.05	13%		0.20	0.02	12%
20	PUR	0.30	0.03	9%		0.27	0.21	78%
	MUF	0.25	0.03	13%		0.13	0.24	182%
	PRF	0.29	0.04	13%		-0.72	0.89	123%
	Vollholz	0.28	0.20	72%		0.05	0.13	287%

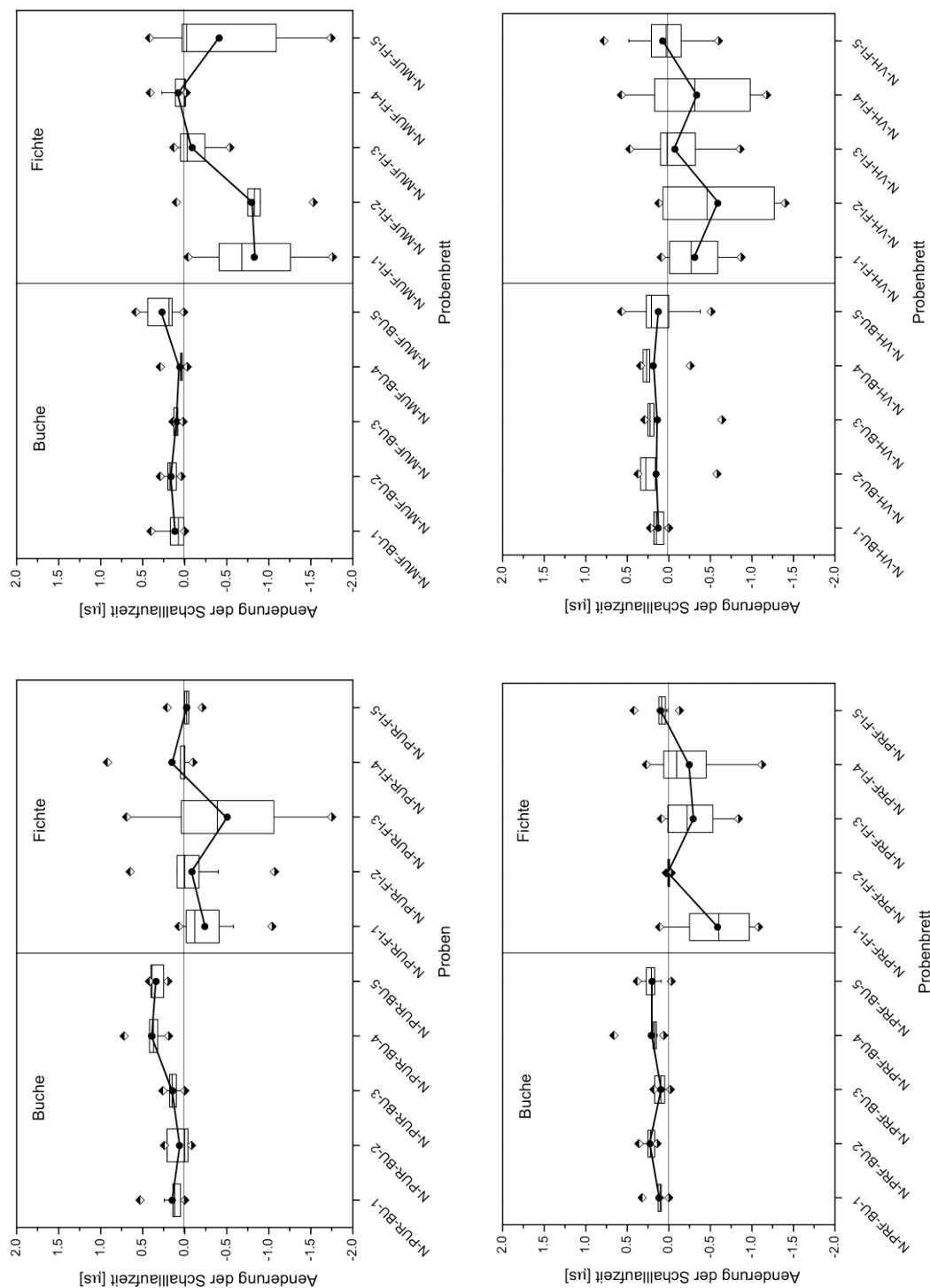


Abbildung 69: Boxplot der Änderung der Schalllaufzeit nach einer natürlichen Bewitterung. Dabei ist der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Monaten.

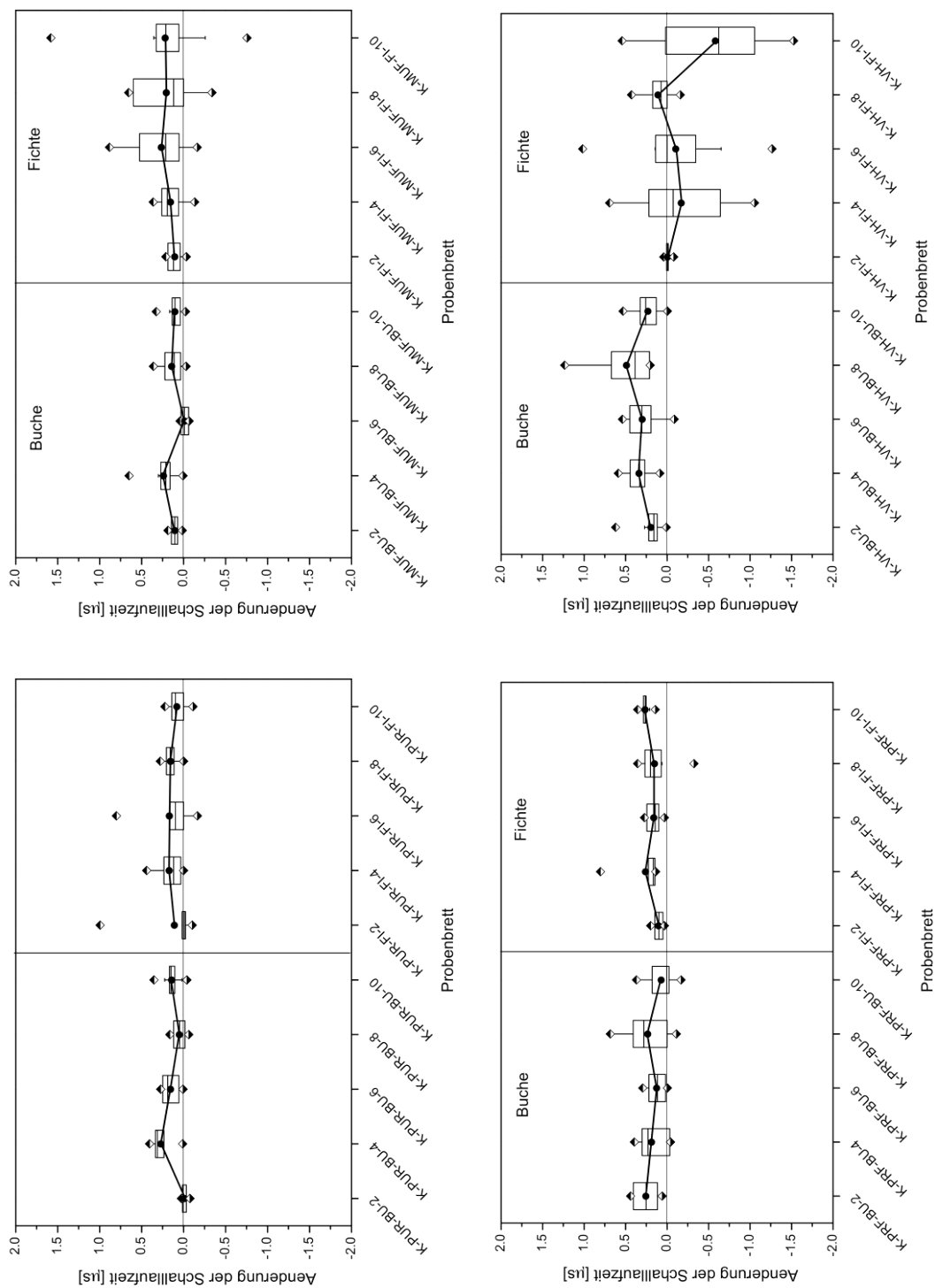


Abbildung 70: Boxplot der Änderung der Schalllaufzeit nach einer künstlichen Bewitterung. Dabei ist der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Monaten.

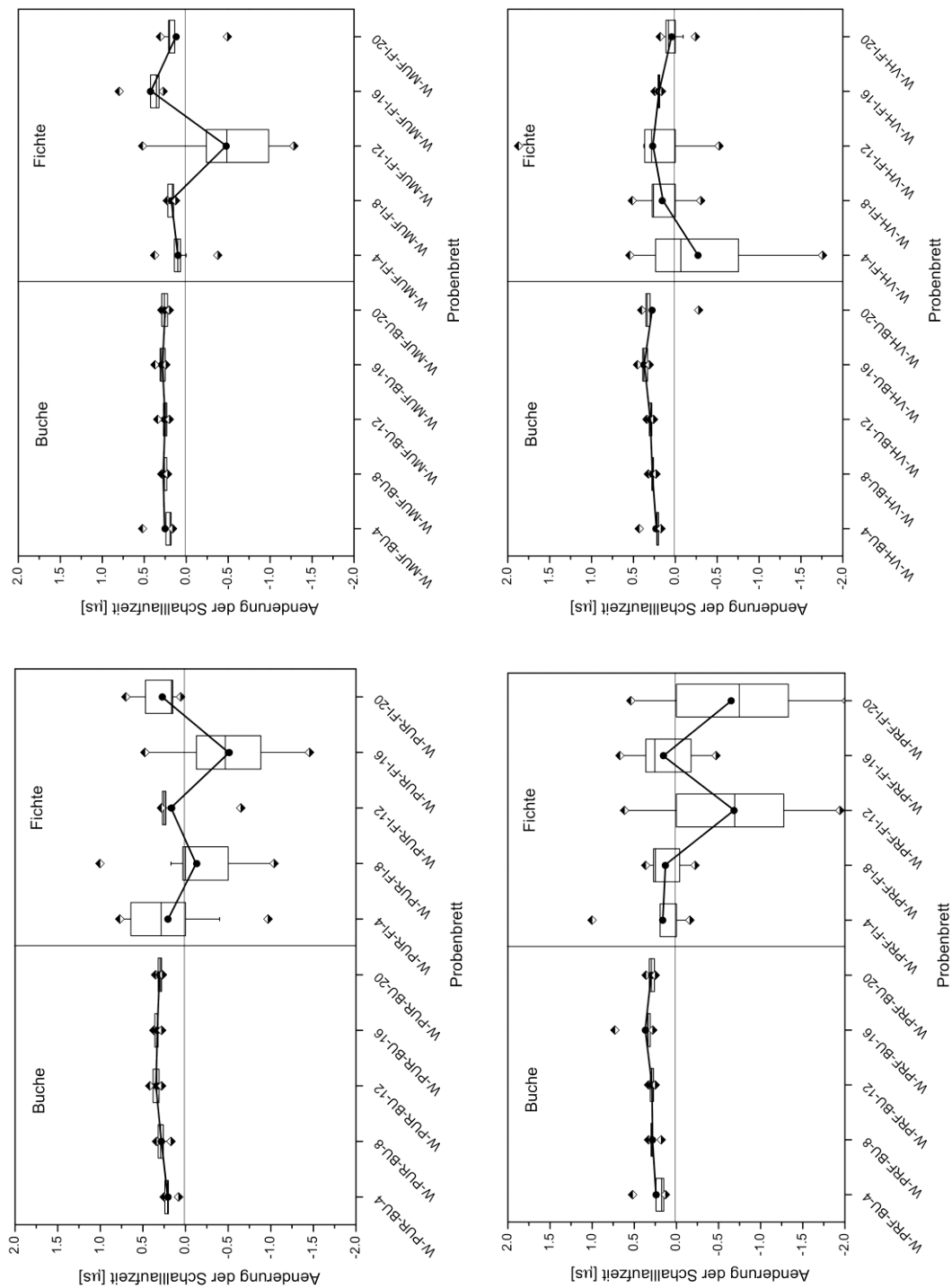


Abbildung 71: Boxplot der Änderung der Schalllaufzeit nach einer Wechselklimalagerung. Dabei ist der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Monaten.

Anhang B: Änderung der Eigenfrequenz

Tabelle 11: Änderung der Eigenfrequenz der Probenbretter nach dem Einfluss einer natürlichen Bewitterung. Die relative Änderung der Frequenz ist auf die ermittelte Eigenfrequenz vor der Behandlung bezogen.

Zykluszahl	Klebstoff	absolute Änderung der Eigenfrequenz [Hz]	relative Änderung der Eigenfrequenz [%]		absolute Änderung der Eigenfrequenz [Hz]	relative Änderung der Eigenfrequenz [%]
		<i>Buche</i>			<i>Fichte</i>	
1	PUR	-9	2.02		-5	1.02
	MUF	-8	1.85		-2	0.39
	PRF	0	0.00		-4	0.78
	Vollholz	-10	2.26		-9	1.62
2	PUR	-5	1.11		-2	0.37
	MUF	-11	2.46		-5	0.99
	PRF	-13	2.91		0	0.00
	Vollholz	-14	3.07		-3	0.56
3	PUR	-8	1.88		-4	0.76
	MUF	-7	1.59			71.95
	PRF	-8	1.82		-6	1.16
	Vollholz	-10	2.16		-4	0.73
4	PUR	-6	1.40		-2	0.41
	MUF	-2	0.46		1	-0.18
	PRF	-7	1.62		1	-0.19
	Vollholz	-8	1.74		0	0.00
5	PUR	-11	2.48		-1	0.18
	MUF	-7	1.57		-2	0.39
	PRF	-9	2.10			58.17
	Vollholz	-7	1.52		0	0.00

Tabelle 12: Änderung der Eigenfrequenz der Probenbretter nach dem Einfluss einer Wechselklimalagerung (feucht/trocken). Die relative Änderung der Frequenz ist auf die ermittelte Eigenfrequenz vor der Behandlung bezogen.

Zykluszahl	Klebstoff	absolute Änderung der Eigenfrequenz [Hz]	relative Änderung der Eigenfrequenz [%]		absolute Änderung der Eigenfrequenz [Hz]	relative Änderung der Eigenfrequenz [%]
		<i>Buche</i>			<i>Fichte</i>	
4	PUR	-6	1.34		51	-10.12
	MUF	-98	22.53		128	-22.15
	PRF	-112	26.05		109	-20.00
	Vollholz	19	-4.13		-130	24.34
8	PUR	-11	2.47		41	-7.47
	MUF	-159	35.49		80	-14.87
	PRF	-82	19.25		77	-15.04
	Vollholz	-97	21.41		32	-5.93
12	PUR	-6	1.34		0	0.00
	MUF	-6	1.37		40	-8.00
	PRF	-141	32.56		69	-13.48
	Vollholz	-70	15.49		70	-13.04
16	PUR	-11	2.47		-43	8.22
	MUF	-13	2.91		-20	3.57
	PRF	-109	24.12		103	-18.23
	Vollholz	-63	13.70		143	-23.60
20	PUR	-92	20.81		62	-10.26
	MUF	-15	3.34		87	-15.79
	PRF	-38	8.78		-40	8.02
	Vollholz	-146	31.47		-383	73.65

Anhang C: Ermittlung der Restfestigkeit

Tabelle 13: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Buche</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]
1	PUR	10	11.42	11.90	2.31	19.4%	9.21	15.11
	MUF	8	14.51	12.46	3.69	29.6%	7.93	15.59
	PRF	8	10.87	11.19	1.74	15.6%	9.03	14.53
	Vollholz	8	10.38	11.54	1.90	16.4%	9.97	14.13
2	PUR	9	12.08	12.07	1.02	8.5%	10.20	13.90
	MUF	8	10.20	10.66	1.30	12.2%	8.89	12.64
	PRF	8	11.52	10.48	1.99	19.0%	7.80	12.20
	Vollholz	8	11.38	11.04	0.81	7.3%	9.63	11.76
3	PUR	10	9.91	9.97	2.85	28.5%	4.34	14.01
	MUF	8	12.87	12.65	0.75	5.9%	11.57	13.56
	PRF	8	14.24	13.01	2.46	18.9%	9.10	15.50
	Vollholz	8	11.87	12.01	1.06	8.8%	10.89	14.18
4	PUR	9	10.74	10.55	2.56	24.3%	5.10	13.69
	MUF	8	13.18	12.77	1.77	13.9%	9.99	15.46
	PRF	8	9.36	8.81	4.03	45.8%	0.60	14.09
	Vollholz	8	11.13	10.78	0.93	8.6%	9.51	11.78
5	PUR	10	11.37	11.60	2.01	17.3%	9.18	14.57
	MUF	8	12.52	11.90	1.46	12.3%	9.66	13.58
	PRF	8	5.17	8.10	5.01	61.9%	3.52	14.94
	Vollholz	8	11.09	11.08	0.77	6.9%	10.00	11.97
Referenz	PUR	10	12.05	11.74	1.85	15.7%	8.47	14.70
	MUF	10	11.01	10.91	1.57	14.4%	8.60	12.76
	PRF	10	11.17	12.27	2.30	18.8%	10.00	16.02
	Vollholz	10	9.86	9.85	0.53	5.4%	8.73	10.65

Tabelle 14: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Fichte</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]
1	PUR	10	7.32	7.38	0.67	9.0%	6.34	8.31
	MUF	8	7.96	8.24	1.04	12.7%	7.07	9.87
	PRF	7	9.12	8.75	1.39	15.9%	6.35	10.39
	Vollholz	8	7.87	7.81	1.14	14.6%	6.14	9.20
2	PUR	10	7.68	7.77	0.84	10.9%	6.66	8.88
	MUF	8	8.24	8.05	1.18	14.7%	6.01	9.49
	PRF	8	9.33	9.34	0.94	10.1%	8.07	10.73
	Vollholz	8	7.88	8.12	1.90	23.4%	6.18	11.79
3	PUR	10	7.28	7.20	1.03	14.3%	5.57	8.53
	MUF	8	9.21	9.32	1.13	12.2%	7.51	11.23
	PRF	8	7.07	6.99	1.00	14.3%	5.59	8.86
	Vollholz	8	7.34	7.19	1.07	14.9%	5.23	8.87
4	PUR	9	8.23	8.15	1.54	18.9%	5.58	9.94
	MUF	8	7.86	8.06	1.09	13.5%	6.74	9.60
	PRF	8	6.97	6.80	1.05	15.5%	5.12	8.29
	Vollholz	8	8.77	8.97	1.91	21.3%	6.80	12.32
5	PUR	8	8.81	8.85	0.79	8.9%	7.93	9.98
	MUF	8	8.93	8.75	1.16	13.3%	6.48	10.09
	PRF	8	9.15	9.52	0.95	10.0%	8.46	11.39
	Vollholz	8	6.99	6.78	0.68	10.0%	5.34	7.32
Referenz	PUR	10	8.62	8.47	1.35	16.0%	5.88	10.79
	MUF	10	7.36	7.17	1.22	17.0%	5.50	8.83
	PRF	10	8.02	8.13	0.82	10.1%	7.05	9.81
	Vollholz	10	7.24	7.56	1.27	16.9%	5.60	10.24

Tabelle 15: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Buche</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]
2	PUR	8	12.82	13.74	2.29	16.7%	10.74	17.13
	MUF	8	12.34	11.36	2.07	18.2%	8.51	13.39
	PRF	2	6.78	6.78	0.42	6.3%	6.48	7.08
	Vollholz	7	8.17	7.39	2.19	29.6%	3.38	9.45
4	PUR	8	10.79	11.57	2.12	18.3%	9.12	16.07
	MUF	8	11.47	11.59	0.99	8.6%	10.37	12.83
	PRF	8	11.25	10.84	1.21	11.1%	9.08	12.10
	Vollholz	8	10.80	10.64	1.20	11.2%	8.66	12.40
6	PUR	8	12.41	12.60	0.70	5.6%	11.83	13.79
	MUF	8	11.56	11.51	1.55	13.5%	8.38	13.41
	PRF	8	10.23	10.84	1.65	15.2%	8.90	12.90
	Vollholz	8	11.43	11.24	1.38	12.3%	9.13	12.94
8	PUR	8	13.78	13.42	1.95	14.6%	9.11	15.39
	MUF	8	10.07	9.98	1.71	17.1%	7.13	12.23
	PRF	8	9.59	9.59	0.74	7.7%	8.23	10.61
	Vollholz	6	8.19	8.00	0.92	11.6%	6.60	8.94
10	PUR	8	13.57	13.19	1.61	12.2%	10.49	14.98
	MUF	8	11.11	10.05	4.09	40.7%	3.24	14.15
	PRF	8	9.22	9.31	0.56	6.0%	8.60	10.13
	Vollholz	8	9.07	9.64	1.92	20.0%	7.17	12.46
Referenz	PUR	10	12.05	11.74	1.85	15.7%	8.47	14.70
	MUF	10	11.01	10.91	1.57	14.4%	8.60	12.76
	PRF	10	11.17	12.27	2.30	18.8%	10.00	16.02
	Vollholz	10	9.86	9.85	0.53	5.4%	8.73	10.65

Tabelle 16: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Fichte-Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Fichte</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]
2	PUR	8	7.50	7.35	0.83	11.3%	5.93	8.45
	MUF	8	9.64	9.08	2.46	27.1%	5.66	11.54
	PRF	8	8.84	8.72	0.88	10.1%	7.25	9.84
	Vollholz	8	10.11	10.53	1.19	11.3%	9.31	12.02
4	PUR	8	9.83	9.90	1.76	17.7%	7.84	12.51
	MUF	8	9.58	9.37	0.76	8.2%	8.03	10.17
	PRF	8	8.79	8.83	0.61	6.9%	8.07	9.75
	Vollholz	8	7.79	7.81	0.83	10.6%	6.81	9.49
6	PUR	8	9.38	9.26	1.51	16.3%	7.02	11.06
	MUF	8	7.15	7.56	0.98	12.9%	6.26	9.08
	PRF	8	9.04	9.28	0.79	8.5%	8.33	10.71
	Vollholz	8	7.02	7.20	1.13	15.7%	5.50	9.28
8	PUR	8	8.74	9.01	1.14	12.6%	7.51	10.75
	MUF	8	8.33	7.72	1.45	18.8%	5.79	9.52
	PRF	8	6.75	6.79	0.85	12.4%	5.34	8.22
	Vollholz	8	6.95	7.02	1.05	15.0%	5.42	8.26
10	PUR	8	8.82	8.68	0.50	5.8%	7.88	9.35
	MUF	8	7.10	6.89	1.43	20.7%	3.89	8.32
	PRF	7	9.42	8.63	1.83	21.3%	5.92	10.49
	Vollholz	8	6.39	6.68	1.19	17.8%	5.19	8.80
Referenz	PUR	10	8.62	8.47	1.35	16.0%	5.88	10.79
	MUF	10	7.36	7.17	1.22	17.0%	5.50	8.83
	PRF	10	8.02	8.13	0.82	10.1%	7.05	9.81
	Vollholz	10	7.24	7.56	1.27	16.9%	5.60	10.24

Tabelle 17: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Buche</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]
4	PUR	9	10.14	10.33	0.67	6.5%	9.39	11.37
	MUF	10	10.21	10.48	1.19	11.4%	9.05	12.24
	PRF	10	9.91	10.57	2.97	28.1%	7.04	14.86
	Vollholz	10	10.24	10.56	0.61	5.8%	9.97	11.57
8	PUR	10	11.47	11.59	2.20	19.0%	9.11	14.83
	MUF	10	11.11	11.34	1.05	9.3%	10.20	13.35
	PRF	10	11.19	11.25	0.91	8.1%	10.25	12.55
	Vollholz	10	10.36	10.56	0.81	7.6%	9.51	11.78
12	PUR	10	13.07	13.04	1.41	10.8%	10.61	15.96
	MUF	10	13.75	13.78	2.84	20.6%	9.58	17.25
	PRF	10	10.62	10.51	1.82	17.3%	8.31	12.89
	Vollholz	10	10.63	10.63	0.68	6.4%	9.70	11.79
16	PUR	9	10.89	10.91	1.13	10.3%	9.55	12.38
	MUF	10	12.69	12.56	2.25	17.9%	9.71	15.73
	PRF	10	10.90	10.73	2.27	21.1%	8.28	13.57
	Vollholz	10	11.20	11.30	0.97	8.6%	9.49	12.84
20	PUR	10	9.73	10.10	1.37	13.6%	8.03	11.98
	MUF	10	11.04	11.81	1.82	15.4%	9.35	15.02
	PRF	10	7.84	8.90	2.87	32.2%	5.47	13.15
	Vollholz	10	11.35	11.41	0.62	5.4%	10.32	12.33
Referenz	PUR	10	12.05	11.74	1.85	15.7%	8.47	14.70
	MUF	10	11.01	10.91	1.57	14.4%	8.60	12.76
	PRF	10	11.17	12.27	2.30	18.8%	10.00	16.02
	Vollholz	10	9.86	9.85	0.53	5.4%	8.73	10.65

Tabelle 18: Ermittlung der Restfestigkeit der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Fichte</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]
4	PUR	10	7.45	7.33	0.48	6.6%	6.32	7.97
	MUF	10	9.30	9.38	0.76	8.1%	8.48	10.42
	PRF	10	5.83	5.80	0.92	15.8%	4.27	7.05
	Vollholz	10	6.87	7.20	0.98	13.6%	6.04	9.31
8	PUR	10	7.18	7.13	0.72	10.1%	6.46	8.80
	MUF	10	8.68	8.61	0.50	5.8%	7.87	9.36
	PRF	10	8.19	8.23	1.34	16.3%	6.43	10.22
	Vollholz	10	6.64	7.02	1.36	19.4%	5.46	8.75
12	PUR	10	7.13	7.10	0.73	10.3%	6.20	8.27
	MUF	10	8.07	7.75	1.91	24.7%	5.17	10.40
	PRF	10	7.66	7.74	1.30	16.8%	5.87	9.96
	Vollholz	10	7.08	7.00	1.25	17.9%	4.51	8.49
16	PUR	9	8.11	8.21	0.83	10.1%	6.93	9.55
	MUF	10	7.10	7.04	1.00	14.2%	5.10	8.78
	PRF	10	7.30	7.49	0.82	11.0%	6.42	8.87
	Vollholz	10	8.96	9.07	0.84	9.2%	7.76	10.27
20	PUR	10	8.48	8.68	0.80	9.2%	7.82	10.28
	MUF	10	8.87	8.72	1.27	14.5%	7.21	10.20
	PRF	10	6.79	7.06	1.06	15.0%	5.74	9.51
	Vollholz	10	7.09	7.04	0.92	13.1%	5.76	9.07
Referenz	PUR	10	8.62	8.47	1.35	16.0%	5.88	10.79
	MUF	10	7.36	7.17	1.22	17.0%	5.50	8.83
	PRF	10	8.02	8.13	0.82	10.1%	7.05	9.81
	Vollholz	10	7.24	7.56	1.27	16.9%	5.60	10.24

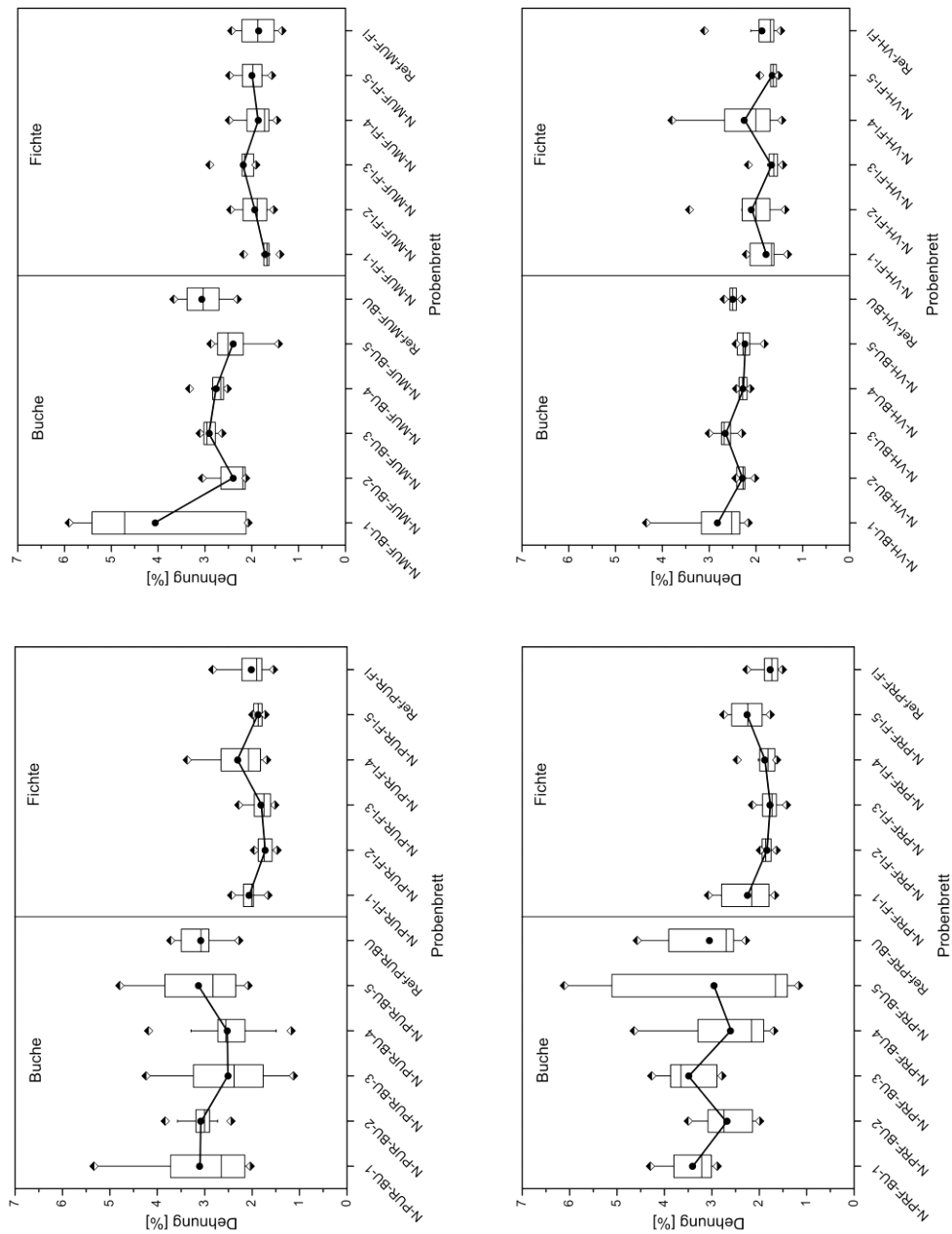


Abbildung 72: Boxplot der Dehnung bei Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Monaten.

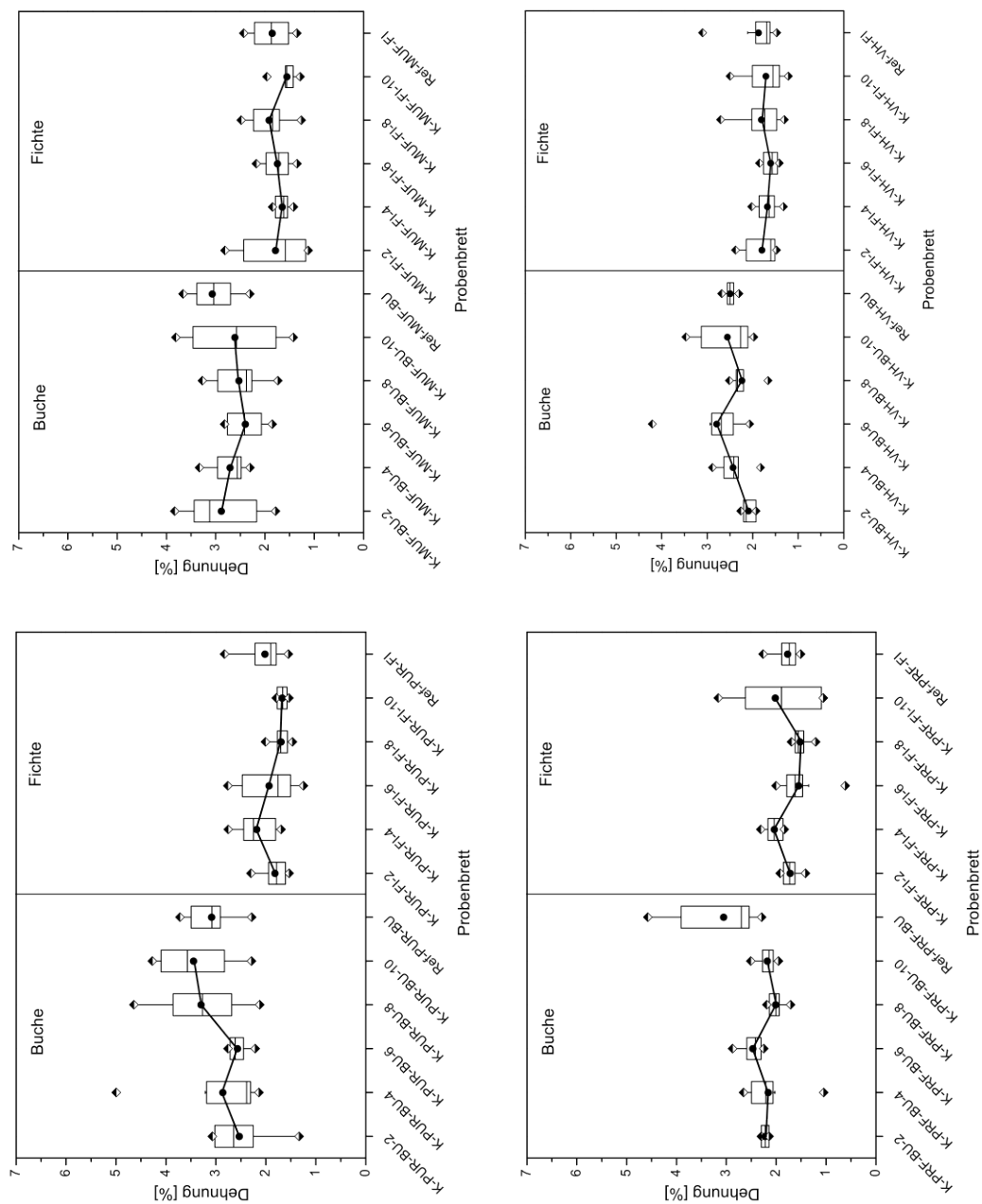


Abbildung 73: Boxplot der Dehnung bei Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Zyklenanzahlen.

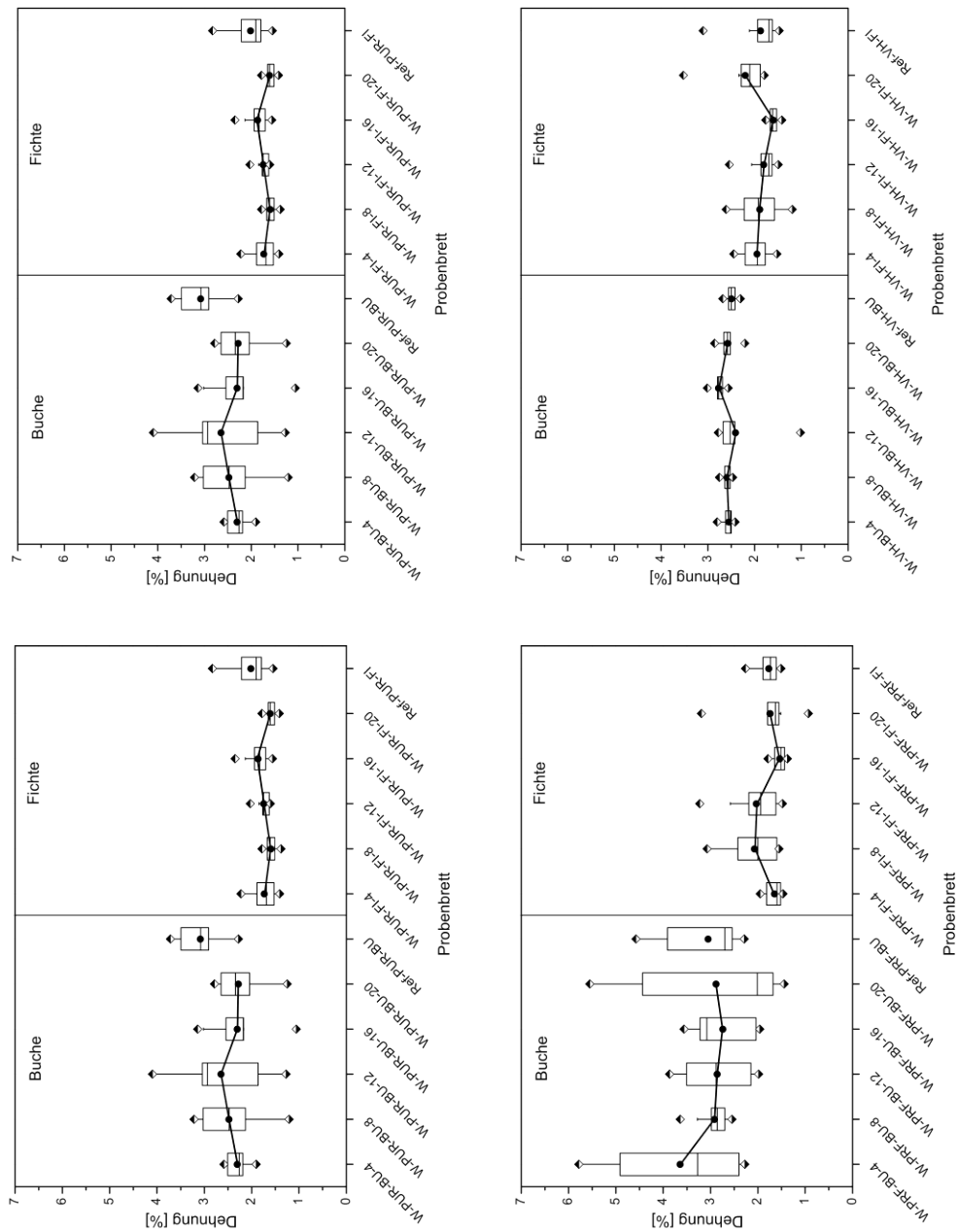


Abbildung 74: Boxplot der Dehnung bei Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung. Die Restfestigkeit wurde mit Hilfe eines Zugscherversuches ermittelt. Zusätzlich ist in den Diagrammen der Verlauf der Medianwerte mit zunehmender Behandlungsdauer aufgezeigt.

Abkürzungen: 1. Stelle: natürliche Bewitterung (N); 2. Stelle: Ein-Komponenten-Polyurethan (PUR), Melamin-Harnstoff-Formaldehyd (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF), Vollholz (VH); 3. Stelle: Buche (BU), Fichte (FI); 4. Stelle: Behandlungsdauer in Zyklenanzahlen.

Tabelle 19: Dehnung der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Buche</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [%]	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
1	PUR	10	2.65	3.11	1.18	37.9%	2.04	5.34
	MUF	8	4.72	4.06	1.68	41.3%	2.08	5.90
	PRF	8	3.21	3.40	0.51	14.8%	2.89	4.30
	Vollholz	8	2.52	2.82	0.72	25.6%	2.16	4.34
2	PUR	9	3.00	3.08	0.42	13.6%	2.45	3.84
	MUF	8	2.19	2.40	0.35	14.7%	2.13	3.06
	PRF	8	2.75	2.68	0.54	20.3%	1.99	3.50
	Vollholz	8	2.28	2.29	0.13	5.9%	2.02	2.43
3	PUR	10	2.38	2.51	0.95	38.0%	1.13	4.24
	MUF	8	2.96	2.91	0.17	5.8%	2.63	3.11
	PRF	8	3.65	3.49	0.56	16.0%	2.79	4.27
	Vollholz	8	2.68	2.65	0.21	7.9%	2.31	3.00
4	PUR	9	2.55	2.52	0.90	35.5%	1.18	4.19
	MUF	8	2.66	2.76	0.26	9.3%	2.52	3.33
	PRF	7	2.17	2.61	1.04	39.7%	1.69	4.64
	Vollholz	8	2.29	2.28	0.11	4.7%	2.13	2.42
5	PUR	10	2.83	3.13	1.02	32.7%	2.08	4.79
	MUF	8	2.51	2.39	0.47	19.5%	1.43	2.88
	PRF	8	1.66	2.95	2.13	72.0%	1.17	6.12
	Vollholz	8	2.28	2.23	0.20	9.1%	1.82	2.43
Referenz	PUR	10	3.08	3.08	0.47	15.2%	2.28	3.72
	MUF	10	3.04	3.07	0.44	14.4%	2.31	3.67
	PRF	10	2.70	3.05	0.80	26.3%	2.29	4.58
	Vollholz	10	2.50	2.50	0.12	4.7%	2.30	2.68

Tabelle 20: Dehnung der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Fichte</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [%]	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
1	PUR	10	2.01	2.06	0.21	10.4%	1.66	2.44
	MUF	8	1.68	1.71	0.22	12.8%	1.40	2.17
	PRF	7	2.16	2.25	0.52	23.0%	1.67	3.07
	Vollholz	7	1.67	1.78	0.31	17.5%	1.32	2.21
2	PUR	10	1.74	1.72	0.17	9.7%	1.47	1.96
	MUF	8	1.88	1.94	0.33	17.1%	1.53	2.45
	PRF	8	1.87	1.84	0.12	6.5%	1.64	1.98
	Vollholz	8	2.00	2.10	0.63	29.9%	1.38	3.42
3	PUR	10	1.75	1.81	0.25	13.8%	1.52	2.28
	MUF	8	2.15	2.18	0.32	14.5%	1.91	2.90
	PRF	8	1.73	1.77	0.23	13.2%	1.43	2.15
	Vollholz	8	1.62	1.67	0.22	13.4%	1.43	2.16
4	PUR	7	2.08	2.30	0.60	26.2%	1.69	3.37
	MUF	8	1.73	1.86	0.34	18.4%	1.46	2.48
	PRF	8	1.82	1.88	0.28	14.6%	1.63	2.47
	Vollholz	8	2.00	2.25	0.78	34.6%	1.45	3.80
5	PUR	8	1.87	1.87	0.10	5.4%	1.73	1.99
	MUF	8	1.98	2.00	0.29	14.8%	1.57	2.48
	PRF	8	2.24	2.26	0.37	16.2%	1.77	2.75
	Vollholz	8	1.63	1.65	0.12	7.6%	1.52	1.92
Referenz	PUR	10	1.90	2.01	0.38	18.7%	1.55	2.83
	MUF	10	1.87	1.85	0.38	20.5%	1.35	2.43
	PRF	10	1.74	1.77	0.22	12.3%	1.51	2.26
	Vollholz	10	1.69	1.87	0.47	25.1%	1.47	3.10

Tabelle 21: Dehnung der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Buche</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [%]	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
2	PUR	8	2.65	2.53	0.60	23.8%	1.33	3.07
	MUF	8	3.12	2.88	0.76	26.2%	1.79	3.83
	PRF	2	2.22	2.22	0.11	5.0%	2.14	2.30
	Vollholz	7	2.15	2.09	0.14	6.5%	1.93	2.26
4	PUR	8	2.38	2.86	0.95	33.3%	2.14	5.00
	MUF	8	2.56	2.71	0.35	12.9%	2.30	3.33
	PRF	8	2.21	2.16	0.50	23.3%	1.05	2.66
	Vollholz	8	2.42	2.43	0.31	12.8%	1.83	2.89
6	PUR	8	2.61	2.57	0.19	7.3%	2.21	2.76
	MUF	8	2.41	2.40	0.39	16.1%	1.85	2.82
	PRF	8	2.42	2.47	0.22	8.9%	2.25	2.88
	Vollholz	8	2.69	2.79	0.64	23.0%	2.07	4.21
8	PUR	8	3.27	3.30	0.82	25.0%	2.12	4.64
	MUF	8	2.38	2.53	0.50	19.9%	1.74	3.27
	PRF	8	2.00	2.01	0.15	7.7%	1.71	2.19
	Vollholz	6	2.34	2.24	0.30	13.3%	1.66	2.52
10	PUR	8	3.57	3.44	0.74	21.5%	2.29	4.27
	MUF	8	2.58	2.61	0.92	35.3%	1.42	3.81
	PRF	8	2.14	2.18	0.18	8.1%	1.96	2.51
	Vollholz	8	2.27	2.56	0.59	23.2%	1.98	3.47
Referenz	PUR	10	3.08	3.08	0.47	15.2%	2.28	3.72
	MUF	10	3.04	3.07	0.44	14.4%	2.31	3.67
	PRF	10	2.70	3.05	0.80	26.3%	2.29	4.58
	Vollholz	10	2.50	2.50	0.12	4.7%	2.30	2.68

Tabelle 22: Dehnung der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Fichte</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [%]	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
2	PUR	8	1.78	1.81	0.25	13.9%	1.54	2.30
	MUF	6	1.59	1.78	0.73	40.6%	1.12	2.81
	PRF	8	1.73	1.72	0.17	9.7%	1.41	1.92
	Vollholz	8	1.60	1.80	0.37	20.6%	1.48	2.38
4	PUR	8	2.25	2.18	0.38	17.6%	1.70	2.76
	MUF	8	1.62	1.65	0.15	9.1%	1.42	1.85
	PRF	8	2.04	2.03	0.18	9.0%	1.83	2.31
	Vollholz	8	1.64	1.67	0.23	13.7%	1.33	2.02
6	PUR	8	1.76	1.94	0.57	29.4%	1.25	2.76
	MUF	8	1.72	1.75	0.29	16.7%	1.35	2.18
	PRF	8	1.62	1.55	0.43	27.8%	0.61	2.00
	Vollholz	8	1.57	1.61	0.17	10.7%	1.42	1.85
8	PUR	8	1.70	1.69	0.17	10.0%	1.47	2.01
	MUF	8	1.85	1.91	0.41	21.5%	1.26	2.48
	PRF	8	1.56	1.52	0.16	10.3%	1.21	1.70
	Vollholz	8	1.74	1.81	0.46	25.6%	1.31	2.71
10	PUR	8	1.66	1.67	0.10	6.1%	1.54	1.79
	MUF	7	1.56	1.55	0.21	13.4%	1.29	1.96
	PRF	7	1.89	2.02	0.78	38.8%	1.06	3.16
	Vollholz	8	1.56	1.71	0.46	27.0%	1.22	2.50
Referenz	PUR	10	1.90	2.01	0.38	18.7%	1.55	2.83
	MUF	10	1.87	1.85	0.38	20.5%	1.35	2.43
	PRF	10	1.74	1.77	0.22	12.3%	1.51	2.26
	Vollholz	10	1.69	1.87	0.47	25.1%	1.47	3.10

Tabelle 23: Dehnung der Klebfuge an Buchen-Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Buche</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [%]	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
4	PUR	9	2.26	2.30	0.22	9.4%	1.90	2.59
	MUF	10	2.43	2.57	0.58	22.6%	1.69	3.85
	PRF	10	3.27	3.64	1.41	38.7%	2.28	5.78
	Vollholz	9	2.52	2.55	0.12	4.8%	2.41	2.80
8	PUR	10	2.48	2.48	0.61	24.5%	1.21	3.22
	MUF	10	2.61	2.66	0.29	10.9%	2.27	3.16
	PRF	10	2.86	2.91	0.33	11.2%	2.55	3.64
	Vollholz	9	2.56	2.59	0.09	3.6%	2.47	2.75
12	PUR	10	2.94	2.65	0.88	33.1%	1.27	4.10
	MUF	10	2.73	3.44	1.51	43.8%	1.56	5.82
	PRF	10	2.88	2.86	0.70	24.6%	1.98	3.87
	Vollholz	9	2.52	2.41	0.54	22.3%	1.02	2.78
16	PUR	9	2.18	2.30	0.60	26.2%	1.06	3.14
	MUF	10	2.68	2.71	0.49	17.9%	2.17	3.43
	PRF	9	3.08	2.74	0.65	23.8%	1.96	3.56
	Vollholz	9	2.77	2.77	0.15	5.5%	2.56	3.02
20	PUR	10	2.35	2.28	0.47	20.8%	1.25	2.79
	MUF	10	2.25	2.24	0.60	26.9%	1.02	3.45
	PRF	10	2.01	2.88	1.56	54.2%	1.44	5.55
	Vollholz	10	2.58	2.58	0.17	6.4%	2.21	2.86
Referenz	PUR	10	3.08	3.08	0.47	15.2%	2.28	3.72
	MUF	10	3.04	3.07	0.44	14.4%	2.31	3.67
	PRF	10	2.70	3.05	0.80	26.3%	2.29	4.58
	Vollholz	10	2.50	2.50	0.12	4.7%	2.30	2.68

Tabelle 24: Dehnung der Klebfuge an Fichten-Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung mit Hilfe eines Zugscherversuches.

<i>Fichte</i>								
Zykluszahl	Klebstoff	Probenumfang	Median [%]	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Variationskoeffizient [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
4	PUR	8	1.69	1.73	0.27	15.3%	1.41	2.23
	MUF	10	1.73	1.72	0.10	5.6%	1.60	1.85
	PRF	10	1.60	1.65	0.17	10.3%	1.47	1.95
	Vollholz	10	1.94	1.95	0.28	14.6%	1.52	2.45
8	PUR	10	1.61	1.59	0.13	8.0%	1.38	1.78
	MUF	10	1.78	1.81	0.20	10.8%	1.56	2.19
	PRF	10	2.00	2.07	0.53	25.5%	1.55	3.08
	Vollholz	9	1.92	1.89	0.46	24.2%	1.19	2.61
12	PUR	9	1.75	1.74	0.13	7.7%	1.61	2.03
	MUF	10	1.75	2.17	0.73	33.8%	1.50	3.40
	PRF	9	1.94	2.03	0.57	27.9%	1.48	3.23
	Vollholz	9	1.70	1.80	0.32	18.0%	1.49	2.55
16	PUR	10	1.83	1.86	0.24	12.9%	1.56	2.35
	MUF	10	1.52	1.56	0.16	10.3%	1.39	1.90
	PRF	10	1.51	1.54	0.14	8.9%	1.38	1.79
	Vollholz	8	1.61	1.60	0.11	6.9%	1.42	1.77
20	PUR	10	1.61	1.61	0.12	7.3%	1.42	1.79
	MUF	10	2.04	2.02	0.42	20.9%	1.46	2.50
	PRF	10	1.63	1.74	0.57	32.7%	0.93	3.19
	Vollholz	10	2.10	2.20	0.50	22.7%	1.79	3.53
Referenz	PUR	10	1.90	2.01	0.38	18.7%	1.55	2.83
	MUF	10	1.87	1.85	0.38	20.5%	1.35	2.43
	PRF	10	1.74	1.77	0.22	12.3%	1.51	2.26
	Vollholz	10	1.69	1.87	0.47	25.1%	1.47	3.10

Tabelle 25: Holzbruchanteil von Zugscherproben nach einer natürlichen Bewitterung.

Zykluszahl	Klebstoff	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Varianationskoeffizient		Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Varianationskoeffizient
		<i>Buche</i>				<i>Fichte</i>		
1	PUR	96	5.2	5.4%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		98	7.1	7.3%
	PRF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
2	PUR	97	4.8	5.0%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	PRF	99	3.5	3.6%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
3	PUR	90	28.3	31.4%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	PRF	99	3.5	3.6%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
4	PUR	88	29.5	33.6%		98	6.7	6.8%
	MUF	88	13.9	15.9%		100	0.0	0.0%
	PRF	98	4.6	4.7%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
5	PUR	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	MUF	85	17.7	20.9%		100	0.0	0.0%
	PRF	98	4.6	4.7%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
Referenz	PUR	98	4.2	4.3%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	PRF	99	3.2	3.2%		99	3.5	3.6%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%

Tabelle 26: Holzbruchanteil von Zugscherproben nach einer künstlichen Bewitterung.

Zykluszahl	Klebstoff	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Varianationskoeffizient		Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Varianationskoeffizient
		<i>Buche</i>				<i>Fichte</i>		
2	PUR	45	46.3	102.9%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		99	3.5	3.6%
	PRF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
4	PUR	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	PRF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
6	PUR	100	0.0	0.0%		99	3.5	3.6%
	MUF	69	43.2	62.9%		100	0.0	0.0%
	PRF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
8	PUR	99	3.5	3.6%		100	0.0	0.0%
	MUF	89	31.8	35.9%		100	0.0	0.0%
	PRF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
10	PUR	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	MUF	55	29.8	54.1%		100	0.0	0.0%
	PRF	100	0.0	0.0%		99	3.5	3.6%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
Referenz	PUR	98	4.2	4.3%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	PRF	99	3.2	3.2%		99	3.2	3.2%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%

Tabelle 27: Holzbruchanteil von Zugscherproben nach einer Wechselklimalagerung.

Zykluszahl	Klebstoff	Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Varianationskoeffizient		Mittelwert [%]	Standardabweichung [%]	Varianationskoeffizient
		<i>Buche</i>				<i>Fichte</i>		
4	PUR	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	PRF	96	5.2	5.4%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
8	PUR	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	MUF	99	3.2	3.2%		100	0.0	0.0%
	PRF	100	0.0	0.0%		97	4.8	5.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
12	PUR	93	12.5	13.5%		95	5.3	5.5%
	MUF	97	4.8	5.0%		99	3.2	3.2%
	PRF	100	0.0	0.0%		98	4.2	4.3%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
16	PUR	100	0.0	0.0%		98	4.2	4.3%
	MUF	100	0.0	0.0%		98	4.2	4.3%
	PRF	97	4.8	5.0%		99	3.2	3.2%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		99	3.2	3.2%
20	PUR	100	0.0	0.0%		96	5.2	5.4%
	MUF	100	0.0	0.0%		95	5.3	5.5%
	PRF	98	4.2	4.3%		99	3.2	3.2%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
Referenz	PUR	98	4.2	4.3%		100	0.0	0.0%
	MUF	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%
	PRF	99	3.2	3.2%		100	0.0	0.0%
	Vollholz	100	0.0	0.0%		100	0.0	0.0%

Anhang D: Korrelation Restfestigkeit / Schall- laufzeitänderung

Tabelle 28: Angaben zur Korrelation zwischen der Restfestigkeit und der Schalllaufzeitänderung.

Schnellalterungstest	Klebstofftyp	Holzart	Schnittpunkt mit der Y-Achse		Steigung		Statistik
			Wert	Standardfehler	Wert	Standardfehler	Kor. R-Quadrat
Natürliche Bewitterung	PUR	BU	0.101	0.097	0.014	0.009	0.036
		FI	-0.945	0.705	0.100	0.087	0.012
	MUF	BU	0.433	0.244	-0.023	0.020	0.011
		FI	-1.354	0.928	0.120	0.105	0.013
	PRF	BU	0.144	0.083	0.004	0.007	-0.032
		FI	-1.124	0.355	0.117	0.043	0.216
	VH	BU	-0.265	0.402	0.037	0.035	0.003
		FI	-0.452	0.494	0.026	0.062	-0.024
Künstliche Bewitterung	PUR	BU	0.445	0.136	-0.025	0.010	0.115
		FI	0.332	0.240	-0.019	0.027	-0.015
	MUF	BU	0.126	0.103	-0.002	0.009	-0.025
		FI	0.385	0.270	-0.027	0.032	-0.008
	PRF	BU	0.504	0.225	-0.033	0.022	0.037
		FI	0.101	0.128	0.006	0.015	-0.023
	VH	BU	0.189	0.139	0.009	0.014	-0.016
		FI	-0.631	0.397	0.063	0.049	0.019
Wechselklimalagerung	PUR	BU	0.131	0.054	0.014	0.005	0.148
		FI	-0.372	0.687	0.050	0.088	-0.016
	MUF	BU	0.225	0.052	0.003	0.004	-0.011
		FI	0.043	0.363	0.005	0.043	-0.021
	PRF	BU	0.179	0.062	0.011	0.006	0.050
		FI	-0.702	0.676	0.066	0.089	-0.011
	VH	BU	-0.112	0.112	0.038	0.010	0.204
		FI	-0.109	0.439	0.026	0.058	-0.018

Anhang D: Ultraschallgerät PCUS

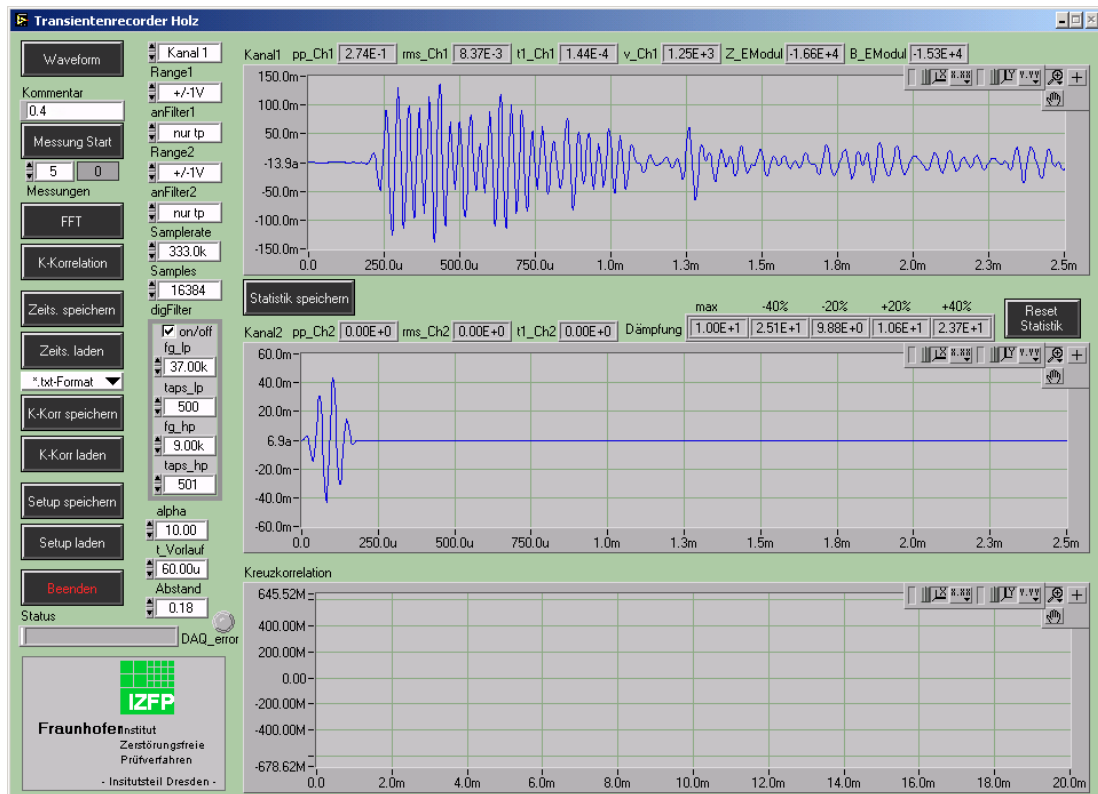


Abbildung 75: Einstellungen bei der Messung mit den Ultraschallgerät PCUS

Anhang E: Holzfehler in den BSH-Proben

Tabelle 29: Position der Holzfehler bei dem BSH

Prüfkörper	Ast	Harzgallex	x [mm]	y [mm]	Brett	Ober-/Unterseite	Astdurchmesser
A		x	635...670	15	6	U	
A		x	850...885	45	6	U	
A	x		790	128...138	5	O	3
A		x	70...105	110	5	U	
A		x	520...560	10	5	U	
A	x		980...995	15...70	4	U	8
A		x	25...50	43	3	U	
A		x	500...530	15	3	U	
A		x	930...1000	85	2	O	
A		x	580...650	7	1	O	
A		x	920...975	45	1	O	
B	x		480	20...27	5	O	3
B	x		805...810	45...65	5	O	7
B		x	685...740	85	5	U	
B		x	380...420	75	3	O	
B		x	645...705	55	3	O	
B		x	45...105	105	1	O	
C	x		970...985	0...10	7	U	
C	x		370...375	0...5	6	O	5
C	x		490...510	60...95	6	O	15
C	x		630	50...60	6	O	2
C	x		755	70...80	6	O	3
C	x		835	60...70	6	O	3
C	x		920...940	0...15	6	O	
C		x	200...240	93	6	U	
C		x	515...545	14	6	U	
C	x		60...65	20...35	5	O	5
C	x		585...595	35...55	5	O	10
C		x	790...850	106	5	O	
C		x	845...870	145	5	O	
C		x	120...180	85	5	U	
C		x	240...270	3	5	U	
C		x	640...700	88	5	U	
C		x	800...840	112	5	U	
C	x		760...790	0...50	4	U	
C	x		55...75	0...10	3	O	
C		x	225...275	146	3	O	
C	x		320	5...15	3	O	3

C		x	360...390	75	3	O	
C		x	395...450	152	3	O	
C	x		730...760	0...25	3	O	15
C		x	875...950	92	3	O	
C		x	990...1000	65	3	O	
C	x		85...105	60...80	3	U	10
C		x	295...325	102	2	O	
C		x	480...625	60	2	U	
C		x	785...860	16	2	U	
C	x		630...660	0...75	1	O	11

Anhang F: Ergebnisse Vorversuche

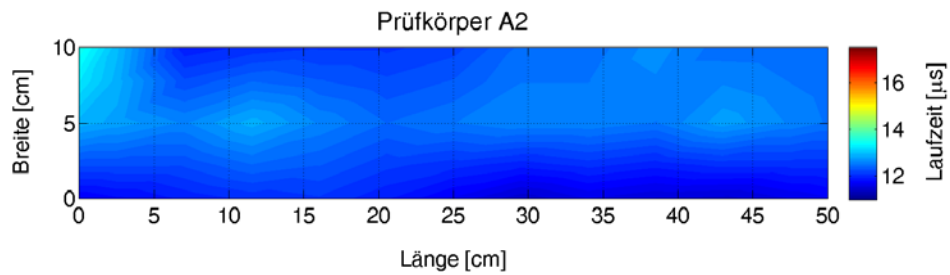


Abbildung 76: Schalllaufzeit Prüfkörper A2 bei 10 mm Dicke

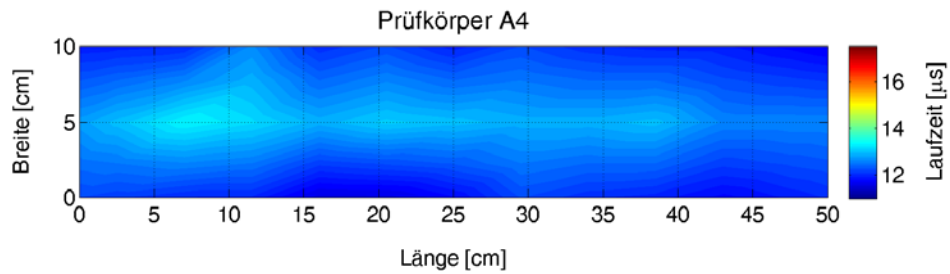


Abbildung 77: Schalllaufzeit Prüfkörper A4 bei 10 mm Dicke

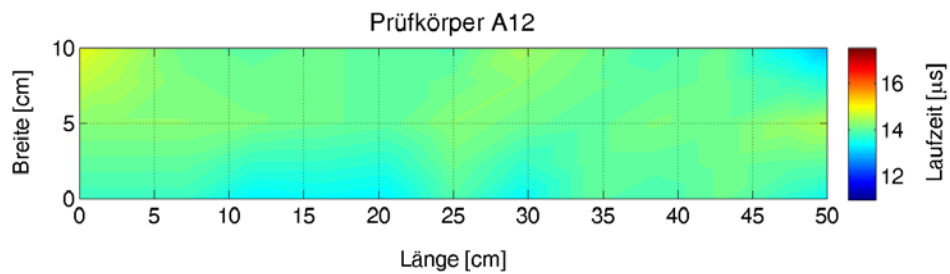


Abbildung 78: Schalllaufzeit Prüfkörper A12 bei 10 mm Dicke

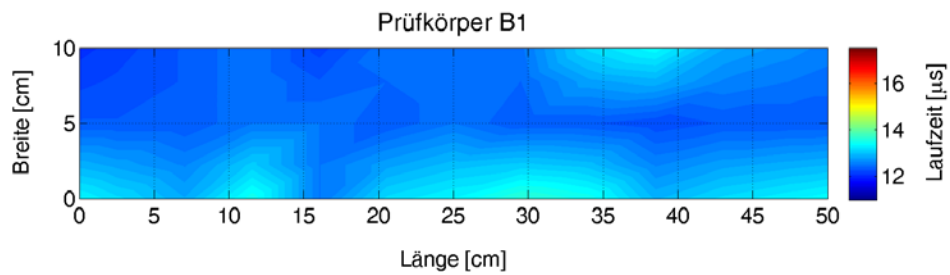


Abbildung 79: Schalllaufzeit Prüfkörper B1 bei 10 mm Dicke

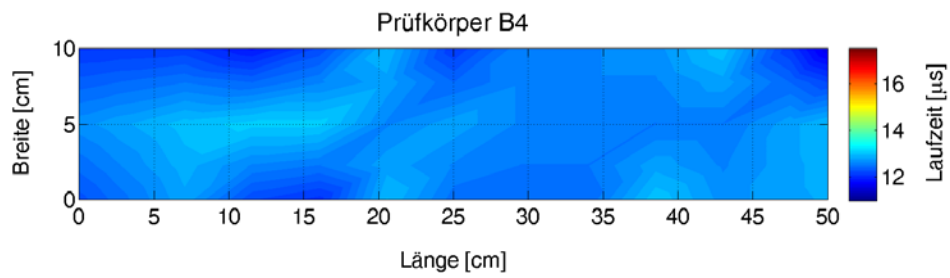


Abbildung 80: Schalllaufzeit Prüfkörper B4 bei 10 mm Dicke

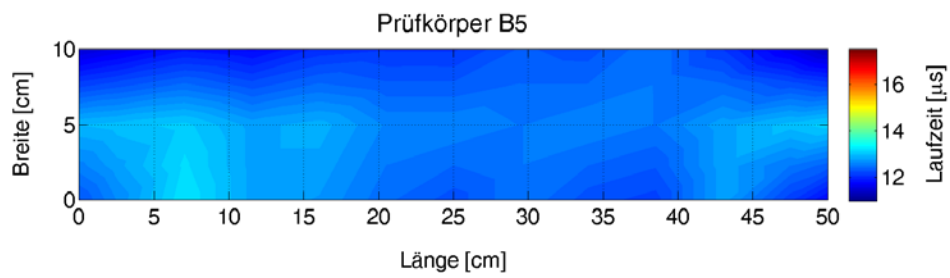


Abbildung 81: Schalllaufzeit Prüfkörper B5 bei 10 mm Dicke

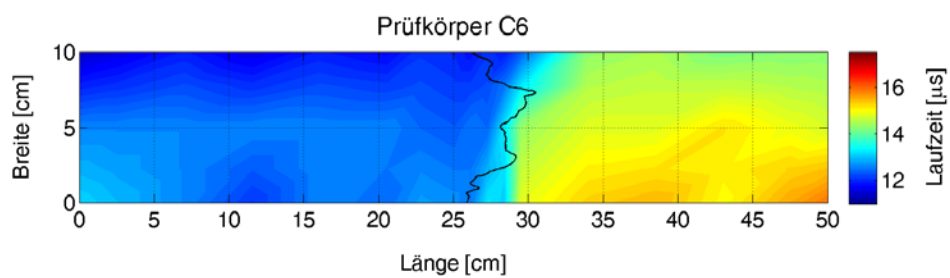


Abbildung 82: Schalllaufzeit Prüfkörper C6 bei 10 mm Dicke

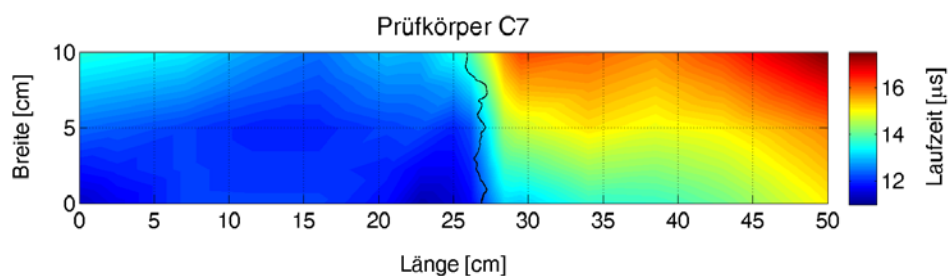


Abbildung 83: Schalllaufzeit Prüfkörper C7 bei 10 mm Dicke

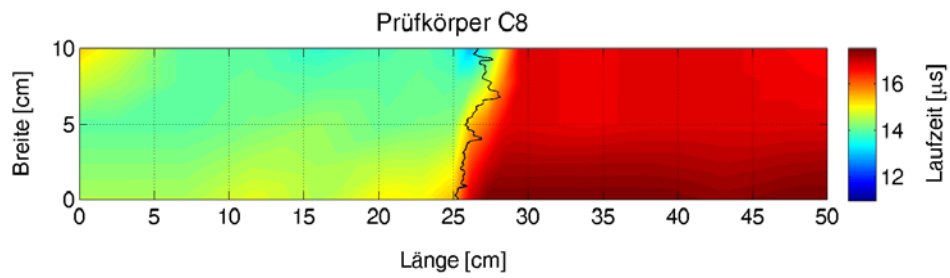


Abbildung 84: Schalllaufzeit Prüfkörper C8 bei 10 mm Dicke

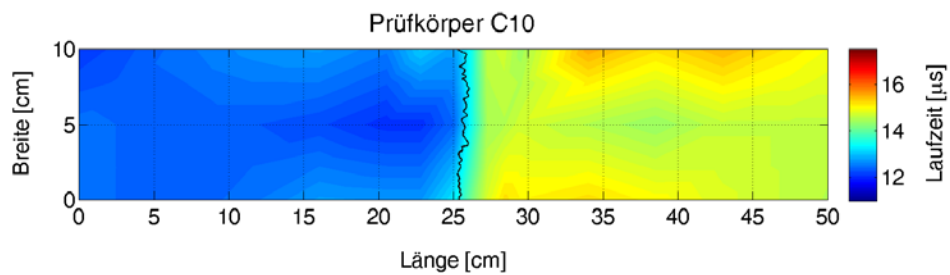


Abbildung 85: Schalllaufzeit Prüfkörper C10 bei 10 mm Dicke

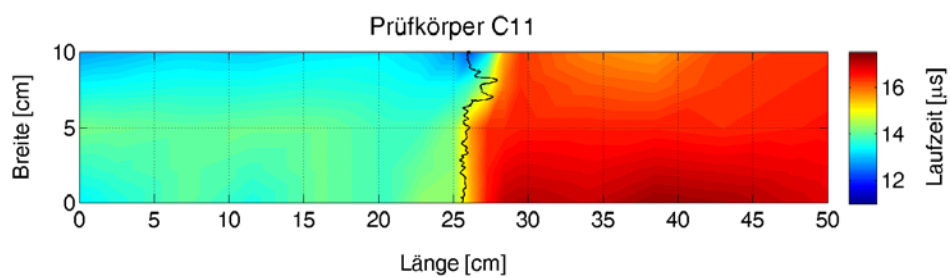


Abbildung 86: Schalllaufzeit Prüfkörper C11 bei 10 mm Dicke

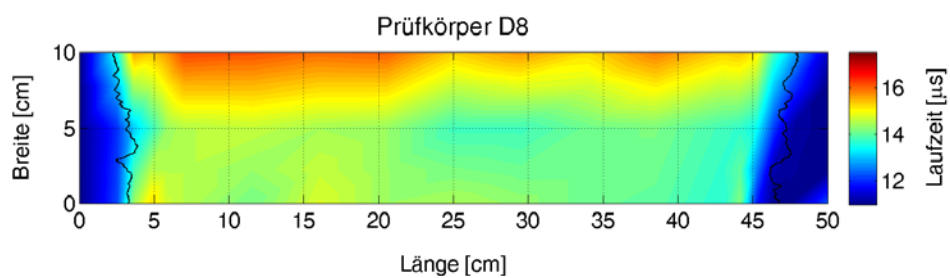


Abbildung 87: Schalllaufzeit Prüfkörper D8 bei 10 mm Dicke

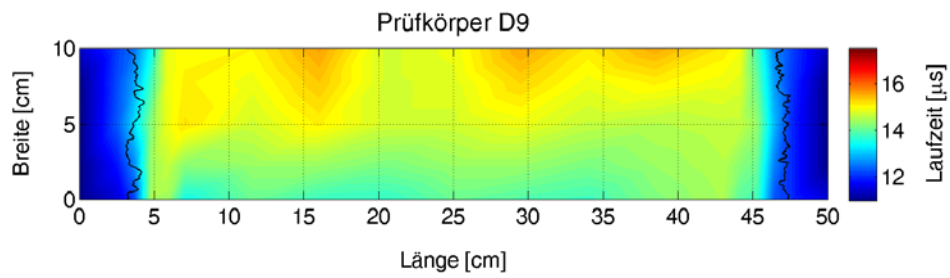


Abbildung 88: Schalllaufzeit Prüfkörper D9 bei 10 mm Dicke

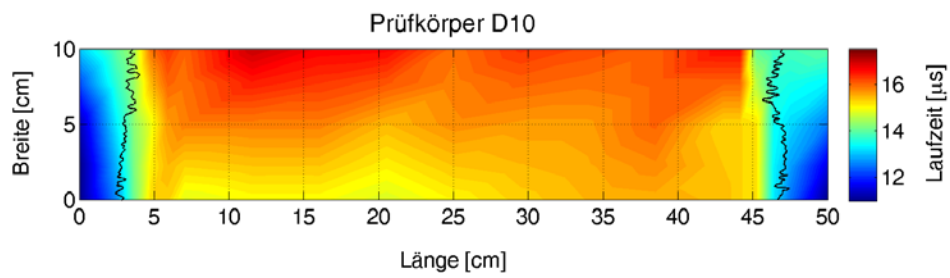


Abbildung 89: Schalllaufzeit Prüfkörper D10 bei 10 mm Dicke

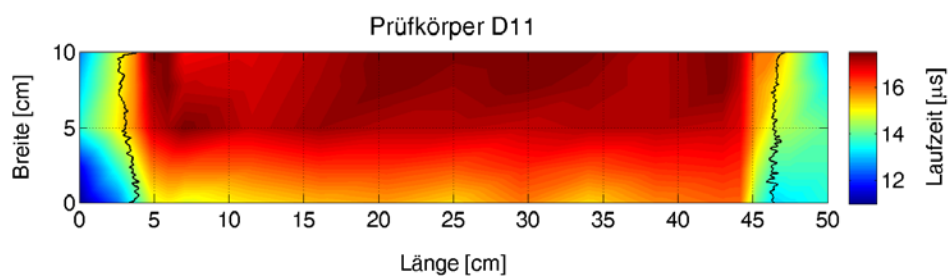


Abbildung 90: Schalllaufzeit Prüfkörper D11 bei 10 mm Dicke

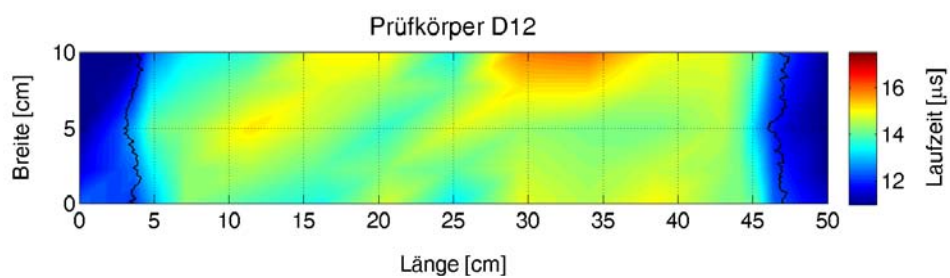


Abbildung 91: Schalllaufzeit Prüfkörper D12 bei 10 mm Dicke

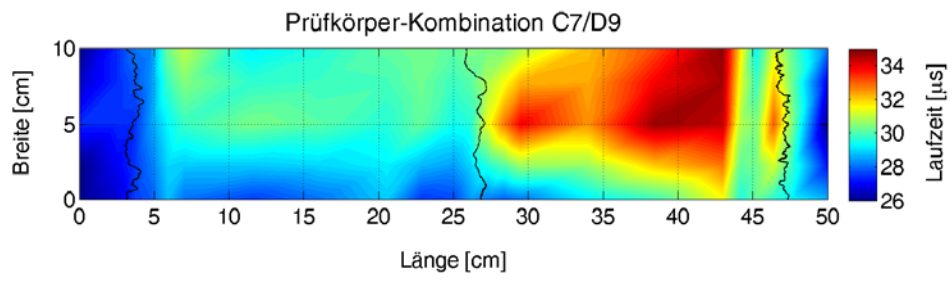


Abbildung 92: Schalllaufzeit Prüfkörper-Kombination C7/D9 bei 20 mm Dicke

Anhang G: Querschnitte BSH



Abbildung 93: Prüfkörper A, Querschnitt links



Abbildung 94: Prüfkörper A, Querschnitt rechts