

Schallemissionsanalyse und Synchrotron-basierte Mikrotomografie an verklebten Miniatur-Zugprüfkörpern aus Fichtenholz

Andreas J. BRUNNER¹, Franziska BAENSCH², Markus G. R. SAUSE³,
Michaela ZAUNER⁴, Peter NIEMZ⁵

¹ Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, Schweiz

² Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde (FH), Eberswalde

³ Universität Augsburg, Institut für Physik, Experimentalphysik II, Augsburg

⁴ ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustoffe, Zürich, Schweiz

⁵ Berner Fachhochschule, Architektur, Bau und Holz, Institut für Holzwerkstoffe und Holz, Biel, Schweiz

Kurzfassung. Für ein vertieftes Verständnis des Schädigungsverlaufs von Lagenholz sind Zugversuche an Miniaturprüfkörpern aus verklebten Fichtenholz-Lamellen mit Schallemission und in-situ Synchrotron-basierter Röntgen-Computer-Mikrotomografie überwacht worden. Zu Vergleichszwecken wurden Zugversuche an Vollholz- und Lagenholz-Prüfkörpern aus Fichte im Labormassstab mit Schallemission überwacht. Die Schallemissionssignale aller Versuche wurden mit Mustererkennung klassifiziert. Dabei ergaben sich zwei Klassen von Signalen mit je zwei Frequenzspitzen. In einer Klasse war die niederfrequente, in der andern die höherfrequente Spitze von höherer Intensität, dies aber im Wesentlichen unabhängig vom Aufbau (Vollholz bzw. Lagenholz) und der Grössenskala der Prüfkörper. Der Einfluss der Klebschichten wurde an Lagenholz-Prüfkörpern im Labormassstab und an Miniaturprüfkörpern mit einer Klebschicht und ausgewählten Faser-Orientierungen untersucht. Dies ergab Hinweise, dass die Schallemissions-Signale aus dem Versagen der Klebschicht vermutlich der Klasse mit Signalen mit niederfrequenter Spitze im Leistungsspektrum zugeordnet werden können.

Einführung

Im Vergleich zu Vollholz sind die Schädigungs- und Versagensmechanismen unter mechanischer Zugbelastung in Holzwerkstoffen wie z.B. Sperrholz noch wenig untersucht worden. Dies gilt vor allem für das Verhalten auf mikroskopischer Skala (Mikrometer und Sub-Mikrometer, d.h. typische Zellgrößen). Das Schädigungsverhalten in Vollholz und Holzwerkstoffen umfasst mehrere Größenskalen, einerseits auf Grund der hierarchischen Struktur von Holz (chemische Beschaffenheit, die Ausrichtung der Cellulose-Fibrillen in den einzelnen Zellwandschichten sowie die Anordnung der unterschiedlichen Zelltypen), andererseits, bei Holzwerkstoffen auch auf Grund der zusätzlichen, mesoskaligen Struktur, die bei Lagenholz durch die Furniere und die Klebschichten entsteht. In Lagenhölzern, wie



Sperrholz, werden die mechanischen Eigenschaften und das Versagensverhalten wesentlich durch die relative Faserorientierung der Furniere sowie den verwendeten Klebstofftyp bestimmt. Die komplexe Wechselwirkung zwischen Dimension und Eigenschaft der mikroskopischen, morphologischen Einheiten (z.B. Zellen) und deren Grenzflächen, sowie die daraus resultierenden mikroskopischen und mesoskopischen Spannungsverteilungen ergeben letztendlich das makroskopisch beobachtete Versagensverhalten.

Für ein besseres Verständnis der Mechanismen wurden Zugversuche an Miniaturprüfkörpern aus je zwei miteinander verklebten Fichtenholz-Lamellen (*Picea abies* [L.] Karst.) mit unterschiedlicher Faser-Orientierung durchgeführt und mittels Schallemission überwacht. Schallemission als volumetrisches Verfahren erfasst das gesamte Volumen der Prüfkörper und liefert Hinweise auf auftretende Schädigung bzw. Veränderungen in den Prüfkörpern mit hoher Zeitauflösung. Dafür wurden zwei Miniatur-Sensoren direkt auf die Oberfläche der Prüfkörper gekoppelt. Für die Auswertung der Schallemissionssignale wurde ein Mustererkennungsverfahren, welches ursprünglich für die Klassifizierung der Schädigungsmechanismen in Faserverbundwerkstoffen mit polymerer Matrix entwickelt worden war [1,2], auf Holz und Holzwerkstoffe übertragen. Vor der Anwendung dieser Signalklassifizierung auf Miniaturprüfkörper mit Verklebung war der Ansatz an von der Dimension her vergleichbaren Miniaturprüfkörpern aus Vollholz erprobt worden, die Details dazu sind in [3,4] publiziert.

Allein mittels Signalklassifizierung lassen sich die mikroskopischen Versagensmechanismen, welche die Schallemissionssignale auslösen, nicht immer eindeutig identifizieren. Daher sind bei den Zugprüfungen von Miniaturprüfkörpern aus Vollholz unterschiedliche Ansätze für die Identifikation der Mechanismen verwendet worden. Einerseits erwies sich die in-situ Kombination von mechanischer Belastung, Schallemissionsüberwachung und periodisch durchgeführter, zerstörungsfreier Synchrotron-basierter Röntgen-Mikrocomputertomografie als nützlich, wobei die Auflösung von Schädigung (z.B. Rissbildung) in den Tomografie-Bildern im Bereich von einigen 10 Mikrometern lag [5]. Daraus ließ sich eine Korrelation zwischen Magnitude der Schallemissionssignale (verwendet wurden die Maximalamplituden der Signale) und Risslänge (aus den Tomografie-Bildern abgeschätzt) herleiten, die zeigte, dass Schallemission wahrscheinlich eine höhere Empfindlichkeit für Schädigungsentwicklung aufweist (mindestens in der hier verwendeten Konfiguration) als die Röntgen-Mikrocomputertomografie. Eine Alternative, die bereits in den Anwendungen für Faserverbundwerkstoffe erfolgversprechende Ergebnisse geliefert hatte, war die Simulation der Schallemissionssignale basierend auf typischen, mikroskopischen Versagensmechanismen sowie deren Ausbreitung und Modifikation im anisotropen Material, inklusive dem Einfluss der verwendeten Sensoren. Ein Vergleich der Klassifizierung simulierter Signale und gemessener Schallemissions-Wellenformen ist nur für geortete Schallemissionsquellen möglich, da sonst die Effekte der Signalausbreitung im Material, die je nach Materialeigenschaften und Ausbreitungsdistanz erhebliche Veränderungen im Frequenzspektrum bewirken, nicht erfasst werden können. Für diese Simulation muss das Material geeignet homogenisiert werden, allerdings darf dabei der anisotrope Charakter des Holzes bzw. des Faserverbundwerkstoffs nicht eliminiert werden. Dieser Ansatz wurde ebenfalls an den Miniaturprüfkörpern aus Vollholz untersucht, die bisher vorliegenden Ergebnisse sind in [6,7] zusammengefasst.

Der vorliegende Beitrag präsentiert im Wesentlichen die Beschreibung des Versagensverhaltens der Miniaturprüfkörper aus verklebten Fichtenholz-Lamellen unter Zugbelastung. Hinsichtlich des übergeordneten Ziels, das Versagen von Lagenholzstrukturen zu vertiefen, wird ein Vergleich mit den Signal-Klassifizierungen aus Zugversuchen an Vollholz, Schicht- und Sperrholz-Prüfkörpern im Labormaßstab ergänzt.

Material und Methodik

1.1 Miniaturprüfkörper aus Fichtenholz mit Klebfuge

Abb. 1 zeigt schematisch die Dimensionen und ausgewählten Orientierungen der Miniaturprüfkörper aus Fichtenholz [4,5] und die hier untersuchten Kombinationen der Faserorientierung im verklebten Schichtverbund (die Verklebung kombiniert zwei longitudinal orientierte Holzlamellen = LL, zwei tangential orientierte Holzlamellen = TT sowie eine Kombination von tangential und longitudinal = TL) sowie die entsprechenden Prüfkörper nach dem Versagen. Für die Klebschicht entlang der Prüfkörper- bzw. Belastungsachse wurde Urea-Formaldehyd-Harz (UF-Harz) verwendet. Die Orientierung der jeweils verklebten Holzlamellen entspricht jenen in Sperrholz bzw. Furnierschichtholz, die in anderen Versuchen bereits im Labormaßstab geprüft worden waren [8,9]. Daher kann das Versagensverhalten sowie die Klassifizierung der Schallemissionssignale über Skalen, die sich um mindestens eine Größenordnung unterscheiden (Länge der Miniaturprüfkörper 3 cm bzw. der Sperrholz- oder Schichtholz-Verbundprüfkörper 40 cm) untersucht werden.

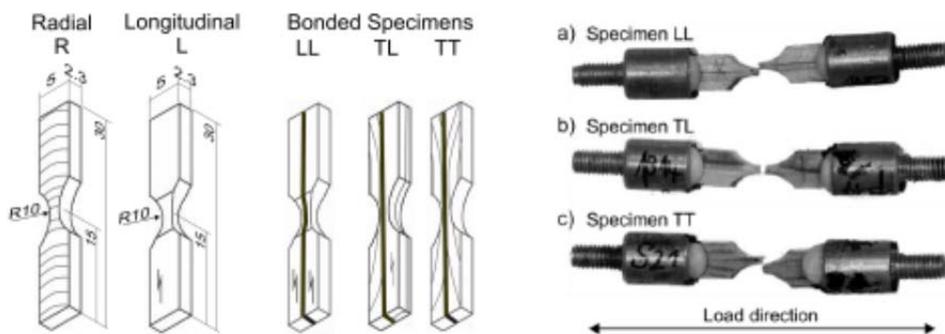


Abb. 1. Links sind schematisch die Dimensionen (in mm) und ausgewählte Orientierungen der Miniaturprüfkörper aus Fichtenholz (Vollholz und verklebter Schichtverbund), rechts sind die drei Typen verklebter Fichtenholz-Miniaturprüfkörper mit Belastungsrichtung und der entsprechenden nominellen Orientierung der beiden Schichten dargestellt (L = longitudinal, R = radial, T = tangential Orientierung der Fasern im Holz; die Verklebung kombiniert zwei longitudinal orientierte Schichten = LL, zwei tangential orientierte Schichten = TT sowie eine Kombination von tangential und longitudinal = TL; R wurden im verklebten Schichtverbund nicht untersucht).

Die Prüfkörper mit Verklebung wurden aus Rohlingen mit einer Länge von 30 mm, einer Breite von 5,7 mm und einer Dicke von 2,3 mm hergestellt. Für die Untersuchung mit Röntgen-Mikrocomputertomografie musste sichergestellt werden, dass das Versagen innerhalb eines definierten Volumens im Bildfeld der Kamera lag. Daher wurden die Prüfkörper so bearbeitet, dass in der Mitte der Querschnitt auf eine Fläche zwischen ca. 1 und 2,6 mm² reduziert wurde (vgl. Abb. 1). Weitere Details zur Probenherstellung sind in [10] beschrieben.

1.2 Zugbelastung

Die Zugbelastung erfolgte mit einer Prüfvorrichtung für Zug- bzw. Druckbelastung (Messzelle mit 1 kN Maximallast), die speziell für die Kombination mit Synchrotron-Röntgen-Mikrocomputertomografie entwickelt worden war [10]. Pro Prüfkörpertyp wurde ein Versuch durchgeführt. Tabelle 1 fasst die Prüfparameter und die wesentlichen Eigenschaften der Prüfkörper zusammen. Prüfanordnung und Details zum Versuchsablauf sind analog zu [11].

Tabelle 1. Eigenschaften und Prüfparameter der Miniaturprüfkörper aus verlebten Fichtenholz

Proben-Typ	Rohdichte [kg/m ³]	Feuchte-gehalt [%]	Quer-schnitt [mm ²]	Lastrate [mm/s]	Zugfestigkeit [MPa]	Anzahl Laststufen [-]	Prüfdauer [Min]
LL	471	9.1	1.01	0.010	44.0	3	60
TL	478	-	1.51	0.010	30.0	3	49
TT	450	7.9	2.60	0.005	2.7	3	56

1.3 Schallemissionsmessung und Mustererkennung

Die Schallemissionsmessungen erfolgten mit einem digitalen Gerät (Typ AMSY-6 von Vallen Systeme GmbH) mit zwei auf den Prüfkörpern gekoppelten Miniatursensoren (Typ M31, Fuji Ceramics Corp. Shizuoka, Japan). Die Sensorhalterungen wurden speziell für die Miniaturprüfkörper entwickelt und hergestellt. Als Koppelmittel wurde ein silikonfreies Vakuum-Schliff-Fett (von Pöllath J.P. Labortechnik, Bamberg, Deutschland) verwendet. Weitere Sensoren (Typ SE-150M) wurden als sogenannte „Guard“-Sensoren zwecks Filterung von Störsignalen auf dem Prüfaufbau befestigt. Die Miniatursensoren haben die höchste Empfindlichkeit im Frequenzbereich zwischen ca. 300 und 800 kHz, unterhalb 300 kHz fällt die Empfindlichkeit deutlich ab. Die Schallemissionssignale wurden mit einer Erfassungsrate von 10 MHz über einen Vorverstärker (34 dB, Typ AEP3) mit Frequenzfilter (Bandbreite 30 bis 960 kHz) und einer Schwelle von 32.1 dB_{AE} (≈0.04 mV) in die Datenerfassung eingegeben. Die 4096 Abtastpunkte („samples“) des Transientenrecorders ergaben eine Signaldauer von 409.6 µs inklusive 18 µs vor Überschreiten der Messschwelle („pre-trigger“). Die sogenannte „rearm time“ betrug 1 ms. Ausschließlich die Schallereignisse, die von beiden Sensoren erfasst wurden sind von Interesse, wobei für die Auswertung mittels Mustererkennung jeweils die ersten Signale benutzt wurden. Die maximale Ausbreitungsdistanz (Distanz Ereignisort zum Sensor) in den Prüfkörpern betrug ca. 10 mm. Die Materialdämpfungskorrektur (geschätzt auf etwa -0.25 dB_{AE} pro cm [12]) wurde vernachlässigt, auch wenn nicht definitiv ausgeschlossen werden kann, dass diese im Nahfeld eventuell höher ist. Die lineare Quellenortung aus den Signalen des Ereignisses für die verklebten Miniaturprüfkörper wurde nicht weiter untersucht.

Für die Mustererkennung wurden folgende Signal- bzw. Leistungsspektrums-Parameter verwendet: Ausgewertet wurden die ersten 25.6 µs (256 „samples“) ohne die 18 µs „pre-trigger“ für jedes Signal und unter Verwendung eines Hamming-Fensters die Spitzenfrequenz (Englisch: peak frequency, PF), die Schwerpunktsfrequenz (Englisch: center of gravity frequency, CGF) sowie die gewichtete Spitzenfrequenz (Englisch: weighted peak frequency, WPF) bestimmt. Zusätzlich wurde das Leistungsspektrum zwischen 0 und 1200 kHz in sechs gleiche Anteile von je 200 kHz Breite aufgeteilt und die entsprechenden Leistungsanteile (Englisch: partial powers, PP) berechnet. Diese Parameter wurden dann in den Mustererkennungsalgorithmus importiert (für weitere Details siehe [1,2]).

1.4 Synchrotron-basierte Röntgen-Mikro-Computertomografie

Als Quelle für die Synchrotron-Röntgenstrahlung wurde die „Swiss Light Source“, ein Elektronensynchrotron am Paul Scherrer Institut in Villingen (Schweiz) bzw. die sogenannte „TOMCAT“ Strahllinie [12] verwendet. Die digitale Auflösung der Kamera betrug 1.62 µm pro Pixel. Für weitere experimentelle Details dazu wird auf [3,5,10] verwiesen.

2. Ergebnisse und Diskussion

2.1 Klassifizierung der Schallemissionssignale

Für jeden Prüfkörper wurde mittels des Mustererkennungsverfahrens eine „best-mögliche“ Trennung der Schallemissionssignale in entsprechende Klassen vorgenommen (Details des verwendeten Algorithmus finden sich in [1]). Für sämtliche Typen verklebter Miniaturprüfkörper ergaben sich zwei Klassen von Schallemissionssignalen (Abb. 2), die anhand der Parameter Partial Power 2 (PP2) und gewichteter Spitzenfrequenz (WPF) aufgetragen sind. Die beiden Cluster A und B unterscheiden sich durch je einen höheren Anteil nieder- bzw. höher-frequenter Signalkomponenten (PP2 umfasst Frequenzen von 200-400 kHz). Eine ähnliche Trennung der Schallemissionssignale wurde bereits in vorangegangenen Zugversuchen an Miniaturprüfkörpern aus Vollholz ermittelt, wobei das nieder-frequente Cluster auf Separationsvorgänge zwischen den einzelnen Zellwand-schichten einer Zelle oder zwischen den Zellwänden zweier benachbarter Zellen zurückgeführt werden konnte, und Zellwandbrüche vermutlich die Quellereignisse der höher-frequenten Cluster sind (vgl. [4,5]). Auf Grund der Analogie in der Klassifizierung, werden für die verklebten Miniaturprüfkörpern ähnliche Mechanismen als Ursprung der beiden Cluster A und B vermutet. Zudem zeigten die Auswertungen, dass jeder Cluster Signale bei jeder Laststufe liefert, es sich also nicht um Mechanismen handelt, die von der aufgebrachten Last abhängen bzw. erst bei höheren Lasten oder zunehmender Schädigung aktiviert werden.

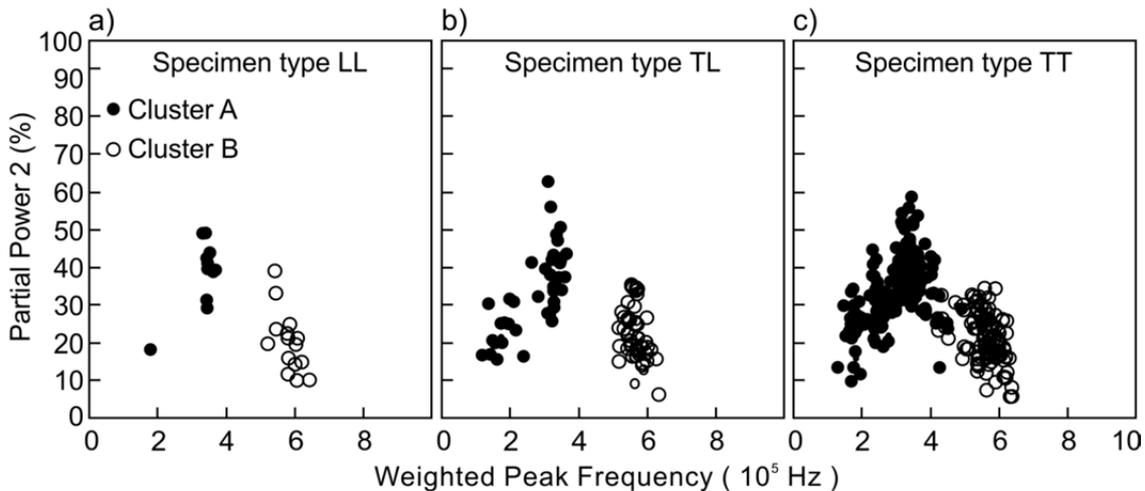


Abb. 2. Klassifizierung der Schallemissionssignale aus den Zugversuchen an Miniaturprüfkörpern aus verklebten Fichtenholz-Lamellen mit verschiedenen nominellen Orientierungen der beiden Lamellen (L = longitudinale Orientierung, T = tangentielle Orientierung der Fasern im Holz) dargestellt mit Partial Power 2 (200-400 kHz) in Funktion der gewichteten Spitzenfrequenz (WPF).

Die scheinbare Aufteilung des nieder-frequenten Clusters A in Abb. 2 in zwei Teilcluster wird basierend auf den Validierungsindizes des Mustererkennungsalgorithmus nicht als „best-mögliche“ Trennung aller Signale favorisiert. Es kann allerdings nicht eindeutig ausgeschlossen werden, dass eine andere Wahl der Klassifizierungsparameter, z.B. ein engeres Intervall der Partial Powers in Schritten von 100 statt 200 kHz, nicht doch zu einer Trennung des niederfrequenten Clusters in zwei auch statistisch unterscheidbare Teilmengen (mit WPF von etwa 180 und 330 kHz, mindestens für die Miniaturprüfkörper LL und TL) führen könnte. Beim Prüfkörpertyp TT könnte sogar eine Unterteilung des A Clusters in drei Cluster erzielt werden (drittes bei WPF von ca. 240 kHz). Diese Fragen müssten mit weiteren Untersuchungen geklärt werden, da die Anzahl bisher untersuchter

Prüfkörper doch sehr gering ist. Dabei müsste auch die Zuordnung der Cluster zu entsprechenden mikroskopischen Mechanismen nochmals diskutiert werden.

Die Frage, wie sich die Klebschicht auf die Schallemissionssignale und die resultierende Signalklassifizierung auswirkt, kann mit den hier präsentierten Daten nicht abschließend geklärt werden. Daher werden die Signalklassen der verklebten Miniaturprüfkörper vergleichend mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen an Fichtenvollholz, Sperrholz und Schichtholz im Labormaßstab [3] diskutiert.

2.2 Vergleich mit Sperrholz- und Schichtholz-Prüfkörpern

In früheren Untersuchungen wurden Vollholz-, Sperrholz- und Schichtholz-Prüfkörper im Labormaßstab auf Zug bis zum Versagen belastet und die Schallemission überwacht [3,8,9,13]. Mittels Mustererkennungsverfahren wurde für alle geprüften Materialtypen wiederum eine „best-mögliche“ Aufteilung in zwei Signalklassen ermittelt, die in Abb. 3, zum Vergleich mit den Ergebnissen der Miniaturprüfkörper (Abb.2), in Funktion von PP2 (200-400 kHz) und WPF dargestellt.

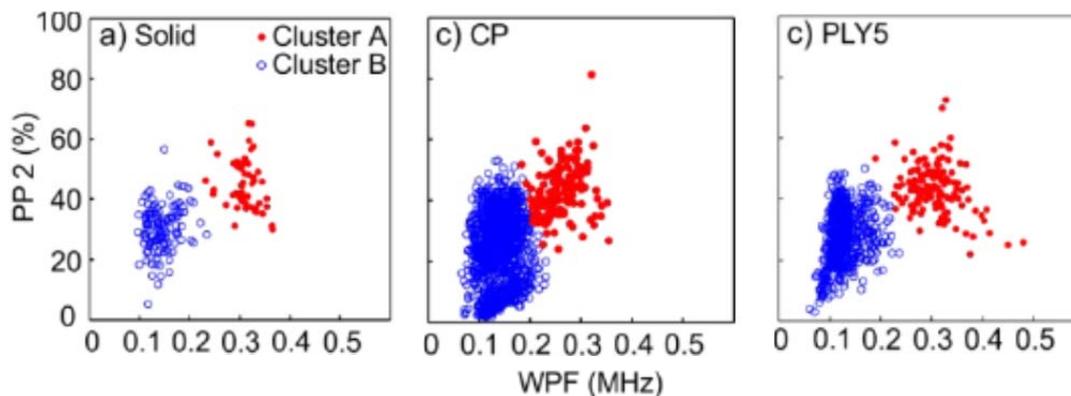


Abb. 3. Klassifizierung der Schallemissionssignale von Zugversuchen an Prüfkörpern im Labormaßstab (links) Vollholz (Solid), (Mitte) drei-lagiges Schichtholz aus gehobeltem Holz ohne Schältschäden mit Mittellage in 90°-Richtung (CP von English Cross-Ply) relativ zur Belastung (rechts) kommerzielles 5-lagiges Sperrholz (PLY5) mit Schältschäden (Auswertung der Signale des Sensortyps SE-1000H).

Die Cluster in Abb. 3 zeigen, dass die Lage der Cluster zwischen Vollholz, Schichtholz und Sperrholz etwa vergleichbar ist, einzig die Anzahl der Signale unterscheidet sich deutlich. Die Daten in Abb. 3 stammen von Sensoren des Typs SE-1000H, bei diesen Versuchen waren auch noch Sensoren des Typs SE-150M und VS-45H verwendet worden. Die Daten dieser Sensortypen ergeben teilweise deutliche Unterschiede in der Anzahl erfasster Signale, auch auf Grund der Unterschiede in der Sensorcharakteristik (auch Im Vergleich zum Typ M31). Die Clusterlage für vergleichbare Auswertung der verklebten Miniaturprüfkörper (Abb. 2) ist ebenfalls vergleichbar, wieder mit gewissen Unterschieden in der Anzahl Signale. Es ist daher denkbar, dass die durch das Versagen der Klebschicht verursachten Signale der Prüfkörpertypen LL, TL, TT in Abb. 2 bzw. der Probentypen CP, PLY5 in Abb. 3 mit den durch Versagen von Holzzellen verursachten, niederfrequenten Signalen zusammenfallen. Möglicherweise liefert die Klebschicht selbst effektiv nur einen geringen Beitrag zur Schallemission und das Versagen tritt eventuell in den Prüfkörpern nahe der Klebschicht, aber im Holz auf. Wie weit diese Hypothese plausibel ist, wird im folgenden Abschnitt kurz diskutiert.

2.3 Ergänzende Röntgen-Mikrocomputertomografie

Wie weit Synchrotron-basierte Röntgen-Mikrocomputertomografie Aufschluss über das Versagensverhalten und den Einfluss der Klebschicht liefern kann, wird anhand der Abb. 4 am Beispiel des Miniaturprüfkörpers LL dargestellt. Ein Vergleich der noch intakten Probe (Abb. 4, links) mit deren Bruchbild (Abb. 4 rechts) nach dem endgültigen Versagen zeigt, dass sich der Riss entlang den natürlichen Schwachstellen in der mikroskopischen Holzstruktur (in der linken Lamelle zwischen Zellen ähnlicher Dimensionen und in der rechten Lamelle entlang der Jahrringgrenze) ausgebildet hat und durch die Klebschicht kaum beeinflusst wurde. Dies ist plausibel, da der verwendete UF-Harzkleber ähnliche bzw. tendenziell eher niedrigere, mechanische Eigenschaften als das Fichtenholz in L-Richtung hat. Dementsprechend ist bei der Klassifizierung der Signale der LL-Prüfkörper kein Hinweis auf das Versagen der Klebschicht erkennbar. Die Miniaturprüfkörper TL und TT weisen hingegen in der Signalklassifizierung die Besonderheit einer möglichen Unterteilung des nieder-frequenten Clusters in weitere Cluster auf. Vermutlich sind in diesen nieder-frequenten Clustern Signale des Klebstoffversagens enthalten. Dies ist plausibel, da der UF Klebstoff im Vergleich zur T-Richtung in Fichtenholz bessere mechanische Eigenschaften aufweist, entsprechend die T-belastete Holzstruktur verstärkt und somit eine wesentliche Bedeutung in der Versagensausbildung, insbesondere bei TT, hat. Ob dies eindeutig und unabhängig von Klebstofftyp und Klebschicht gilt, müsste mit weiteren Untersuchungen verifiziert werden.

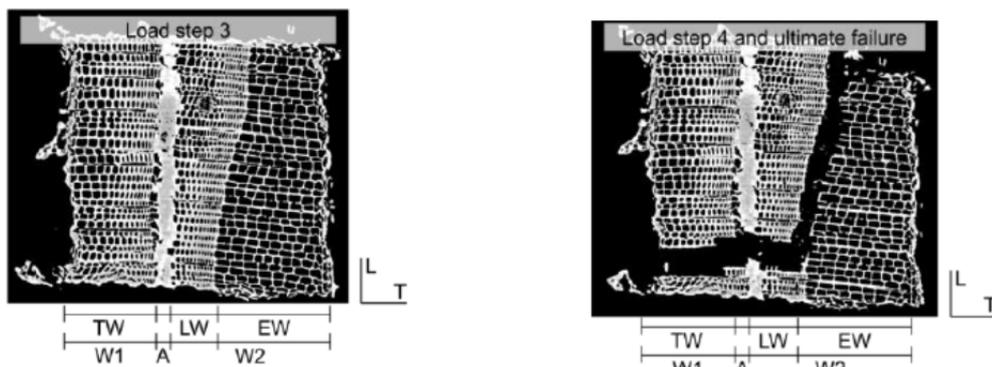


Abb. 4. Versagensbild eines verklebten Fichtenholz-Miniaturzugprüfkörpers (Typ LL) aus Synchrotron-basierter Röntgen-Mikrocomputertomografie (links) vor und (rechts) nach dem Versagen unter Zugbelastung (entlang der L-Richtung), W1 und W2 bezeichnen die beiden Schichten, A die Klebschicht, EW, TW und LW bedeuten Frühholz (Englisch Early Wood EW), Übergangsholz (Englisch Transition Wood, TW) und Spätholz (Englisch Late Wood, LW). Der Rissverlauf wird durch die Klebschicht kaum beeinflusst.

3. Schlussfolgerungen

Das frequenzbasierte Mustererkennungsverfahren, angewendet auf die Ergebnisse aus der Schallemissionsüberwachung von Zugversuchen an Miniaturprüfkörpern aus verklebtem Fichtenholz führte zu einer Signalklassifizierung, die im Wesentlichen zwei Signalklassen ergab. Dies ist vergleichbar zu Versuchen an Sperrholz- und Schichtholz-Prüfkörpern im Labormassstab. Die Frage, wie weit Signale vom Versagen der Klebschicht identifiziert werden, kann nicht abschliessend beantwortet werden, es ist aber wahrscheinlich, dass diese mit dem nieder-frequenten Signalcluster, der vermutlich auf Separationsmechanismen in den Zellwänden oder zwischen den Zellen zurückzuführen ist, zusammenfallen. Für diese Interpretation liefert die Kombination von Schallemission mit in-situ Röntgen-Mikrocomputertomografie erste Hinweise.

4. Dank

Die im vorliegenden Beitrag beschriebenen Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projekts Nr. 200021_127134 „Characterization of failure mechanisms in plywood and LVL from the macroscopic to the microscopic scale by combining optical methods, acoustic emission analysis, electron microscopy, and X-ray tomography“ vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (SNF) finanziell unterstützt.

Referenzen

- [1] M.G.R. Sause, A. Gribov, A.R. Unwin, S. Horn, S.: “Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals”, *Pattern Recognition Letters*, 33, 17–23 (2012).
- [2] M.G.R. Sause, T. Müller, A. Horoschenkoff, S. Horn: “Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis”, *Composites Science and Technology*, 72, 167–174 (2012).
- [3] F. Baensch: „Damage evolution in wood and layered wood composites monitored by in situ acoustic emission, digital image correlation and synchrotron based tomographic microscopy”, Dissertation Institute for Building Materials, ETH Zürich, Nr. 22372, 186 pp. (2015).
- [4] F. Baensch, M.G.R. Sause, A.J. Brunner, P. Niemz: „Damage Evolution in Wood – Pattern Recognition based on Acoustic Emission Frequency Spectra”, *Holzforschung*, 69, Nr. 3, 357-365 (2015).
- [5] F. Baensch, M. Zauner, S.J. Sanabria, B.R. Pinzer, M.G.R. Sause, A.J. Brunner, M. Stampanoni, P. Niemz: „Damage Evolution in Wood – Synchrotron based microtomography as complementary evidence for interpreting acoustic emission behavior“, *Holzforschung* (doi: 10.1515/hf-2014-0152), im Druck (2015)
- [6] L. Vergeynst, M.G.R. Sause, F. Ritschel, A.J. Brunner, P. Niemz, K. Steppe: „Finite element modelling used to support wood failure identification based on acoustic emission signals“, *Proceedings COST - Timber Bridge Conference* (Eds. S. Franke, B. Franke, R. Widmann), 141-146 (2014).
- [7] A.J. Brunner, L. Vergeynst, M.G.R. Sause, F. Baensch, P. Niemz: „Mustererkennung zur Klassierung von Schallemissionssignalen aus Zugversuchen an Miniaturproben aus Fichtenholz: Vergleich für Wellenformen aus Finite Element Modellierung und Experiment“, *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Berichtsband Jahrestagung 2015, Beitrag Di_3_A_1_Brunner* (2015).
- [8] F. Ritschel, A.J. Brunner, P. Niemz: „Nondestructive Evaluation of Damage Accumulation in Tensile Test Specimens made from Solid Wood, Plywood and Laminated Veneer Lumber (LVL)“, *Composite Structures*, 95, 44-52 (2013).
- [9] F. Ritschel, Y. Zhou, A.J. Brunner, Th. Fillbrandt, P. Niemz: „Acoustic emission analysis of industrial plywood materials exposed to destructive tensile loads”, *Wood Science and Technology*, 48, No. 3, 611-631 (2014).
- [10] M. Zauner: “In-situ synchrotron based tomographic microscopy of uniaxially loaded wood: insitu testing device, procedures and procedures and experimental investigations”, Dissertation Institute for Building Materials, ETH Zurich, Nr. 21620, 163 pp. (2014).
- [11] F. Ritschel, M. Zauner, S.J. Sanabria, A.J. Brunner, P. Niemz: „In-situ Kombination von Schallemissionsanalyse und Röntgen-Mikrotomografie mit Zugversuchen an Miniatur-Prüfkörpern aus Fichtenholz“, *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Berichtsband Jahrestagung 2013, Beitrag Mi_3_A_3_Ritschel* (2013).
- [12] V. Bucur, I. Böhnke: “Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood”, *Ultrasonics* 32, Nr. 5, 385-390 (1994).
- [12] M. Stampanoni, A. Groso, A. Isenegger, G. Mikuljan, Q. Chen, D. Meister, M. Lange, R. Betemps, S. Henein, R. Abela: „TOMCAT: a beamline for tomographic microscopy and coherent radiology experiments”, *Synchrotron Radiation Instrumentation*, 879, 848–851 (2007).
- [13] F. Ritschel, Y. Zhou, P. Niemz: „Schallemissionsanalyse von Zugversuchen an industriell gefertigten Sperrhölzern“, *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Berichtsband Jahrestagung 2013, Beitrag Poster_34_Ritschel* (2013).