

Mustererkennung zur Klassierung von Schallemissionssignalen aus Zugversuchen an Miniaturproben aus Fichtenholz: Vergleich für Wellenformen aus Finite Element Modellierung und Experiment

Andreas J. BRUNNER¹, Lidewei L. VERGEYNST², Markus G. R. SAUSE³,
Franziska BAENSCH⁴, Peter NIEMZ⁵

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

² Ghent University, Laboratory of Plant Ecology, Ghent, Belgien

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

⁴ Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH), Eberswalde

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

Kurzfassung. Die Kombination von Mustererkennung zur Klassierung von experimentell ermittelten Wellenformen aus Schallemissionsüberwachung von Belastungsversuchen und von mittels Finite Element Methoden simulierten Signalen wurde ursprünglich zur Identifikation der Quellenmechanismen in Faserverbundwerkstoffen entwickelt. Aufgrund struktureller bzw. morphologischer Ähnlichkeit ist dieser Ansatz auf Holz und Holzwerkstoffe übertragen worden. Die Mustererkennung der experimentell gemessenen Schallemissionssignale hat für Zugversuche an Miniaturproben aus Fichtenholz zwei Signalklassen ergeben. Diese Klassen werden nun mittels Finite Element Simulationen der Wellenformen von Quellmechanismen mit unterschiedlicher Anstiegszeit vergleichend untersucht. Die Bestimmung des Einflusses der Messkette (Sensor bzw. Vorverstärker und Datenerfassung mit Frequenzfiltern) und die dafür verwendeten Ansätze werden diskutiert.

Einführung

Wegen seiner hohen Empfindlichkeit und der gleichzeitig sehr hohen Zeitauflösung ist Schallemissionsanalyse eigentlich ein ideales, zerstörungsfreies Prüfverfahren für die Untersuchung mikroskopischer Schädigungsmechanismen bzw. des Schädigungsverlaufs in Materialien oder Strukturelementen unter statischen oder dynamischen Lasten [1]. Allerdings ist die mittels Ortungsalgorithmen erreichte Lokalisierung der Signalquellen im Material oft weniger genau als jene, die, vor allem in anisotropen Werkstoffen wie Holz oder Faserverbunden, mit bildgebenden Methoden (z.B. Radiografie, Röntgen-Computertomografie, Ultraschall C-Scan) erzielt werden kann. Zudem ist die eindeutige Zuordnung der erfassten Schallemissionssignale zu spezifischen Quellenmechanismen schwierig.



Dafür werden seit vielen Jahren empirische Kriterien beschrieben, die z.B. auf Amplitudenverteilungen basieren (z.B. [2,3]). Ein weiteres Beispiel dafür ist die Bestimmung der Initiierung von Delaminationen in kohlenstoff-faserverstärktem Epoxid durch ein Amplitudenkriterium [4], das zu sinnvollen, quantitativen Ergebnissen führt. Dabei werden die Mechanismen aber nur in einem statistischen Sinn identifiziert, eine eindeutige Zuordnung zwischen einem einzelnen Schallemissionssignal und dem effektiven Quellenmechanismus ist meist nicht möglich.

Ein erster Schritt in Richtung eindeutiger Identifikation von Quellenmechanismen von Schallemissionssignalen war die Erkenntnis, dass Leistungsspektren in Funktion der Frequenz Informationen zu Quellenmechanismen liefern können (z.B. [5]). Allerdings werden die Frequenzspektren sowohl durch die Signalausbreitung im Material als auch die Sensorempfindlichkeit als Funktion der Frequenz beeinflusst. Daraus folgte die Entwicklung und Anwendung von Mustererkennungsverfahren, um einen allgemein gültigeren Ansatz zur Einteilung von Signalklassen zu ermöglichen. Die gemessenen Signale bei Mode-I-Belastung in Faserverbundlaminaten mit polymerer Matrix führten damit zu drei deutlich getrennten Clustern [6]. Dies kann als Hinweis auf unterschiedliche Mechanismen interpretiert werden, erlaubt aber nicht deren Identifikation. Dafür sind weitere Informationen notwendig. Wie am Beispiel der hier diskutierten Miniatur-Zugprüfkörpern aus Fichtenholz in einem andern Beitrag gezeigt, kann Synchrotron-basierte Röntgen-Mikro-Computertomografie Bilder von Schädigung (z. B. Rissbildung) mit einer Auflösung zwischen einigen Mikrometern bis einigen Zehn Mikrometern liefern [7]. Die Probenvolumen sind zurzeit allerdings limitiert auf einige mm³ bis ca. 1 cm³. Die visuell in den Tomografie-Bildern detektierte Schädigung kann mit der beobachteten Schallemission verglichen werden. Dies erlaubte z.B. eine grobe Korrelation der Magnitude der Schallemissionssignale mit der Risslänge (im Detail diskutiert in [8]). Daraus lässt sich abschätzen, dass Schallemission in dieser Kombination mit einem Schwellenwert von 0.04 mV etwas empfindlicher ist als die Röntgen-Tomografie, d.h., dass mittels Schallemission Risse mit einer Fläche bis etwa 1µm² nachweisbar sind.

Ein alternativer Ansatz, der teilweise früher [9,10] und auch hier präsentiert und diskutiert wird, ist die Simulation der vom Sensor aufgezeichneten Schallemissionssignale unter Verwendung von Finite Element Modellen mit typischen Signalquellen. Dieser Ansatz war für Faserverbundwerkstoffe entwickelt worden und durch Vergleich der resultierenden Signalcluster mit denen aus den Experimenten validiert worden [6]. Wegen der Analogie zwischen Faserverbundwerkstoffen und Holz bezüglich Morphologie und anisotropen mechanischen Eigenschaften und daraus resultierender, vergleichbarer Schallemission unter mechanischer Belastung, wurde die Kombination von Mustererkennung und vergleichender Signalsimulation mittels Finite-Element-Methode auf Holzwerkstoffe übertragen.

1. Material und Methodik

1.1 Miniaturzugprüfkörper aus Fichtenholz und Zugbelastung

Die Miniaturzugprüfkörper aus Fichtenholz sind in Abb. 1 dargestellt, ebenso die Kopplung der Miniatursensoren (Typ M31) auf den Prüfkörpern. Die Prüfkörper sind bezüglich Orientierung des Holzes entweder radial oder longitudinal hergestellt und mit einem Polyurethangleber in der Probenhalterung verklebt worden. Sie wurden in eine Belastungsvorrichtung mit einer Lastzelle von 1 kN eingebaut [12] und mit 0.005 (radial) bzw. 0.010 mm/s (longitudinal) bis zum Versagen belastet. Einzelne Versuche wurden schrittweise gefahren, d.h. die Belastung nach Auftreten von Schallemission gestoppt und

die Prüfkörper mit Röntgen-Mikro-Computertomografie auf Schädigungsentwicklung untersucht (siehe [7,8] für Details dazu).

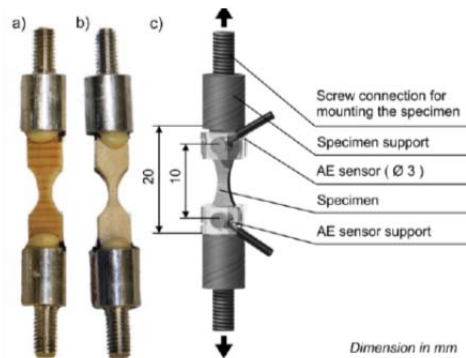


Abb. 1. Fotos der Miniaturzugprüfkörper aus Vollholz, a) radiale und b) longitudinale Orientierung sowie schematische Darstellung der Prüfkörper mit gekoppelten Schallemissionssensoren für den Einbau in die Belastungsvorrichtung (aus [8]).

1.2 Schallemissionsüberwachung, Signalklassifizierung und Finite Element Simulation

Die Schallemissionsmessungen erfolgten mit einem digitalen Gerät (AMSY-6 von Vallen Systeme GmbH) mit zwei auf die Prüfkörper gekoppelten Miniatursensoren (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. Die Schallemissionssignale wurden mit einer Erfassungsrate von 10 MHz über einen Vorverstärker (34 dB, Typ AEP3) mit Frequenzfilter (30 bis 960 kHz) und einer Schwelle von 32.1 dB_{AE} in die Datenerfassung eingegeben. Die 4096 Abtastpunkte („samples“) des Transientenrecorders ergaben eine Signaldauer von 409.6µs inklusive 18µs vor Überschreiten der Messschwelle („pre-trigger“). Die sogenannte „rearm time“ betrug 1ms.

Für die Mustererkennung wurden folgende Signal- bzw. Leistungsspektrums-Parameter verwendet: Ausgewertet wurden die ersten 25.6µs (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 [6,11]).

Alle Finite Element Simulationen wurden innerhalb des „structural mechanics moduls“ der Softwareumgebung Comsol Multiphysics durchgeführt. Der Bruchprozess, der unter Zugbelastung in den Prüfkörpern entsteht, wurde als Dipol mit zwei in entgegengesetzter Richtung wirkenden Kräften, deren Angriffspunkte durch eine Distanz von 0.08 mm getrennt waren, simuliert. Die Belastung wurde als linearer Kraftpuls (Glg. 1) mit einer Maximallast (F_{max}) von 3 N und einer Anstiegszeit (τ) von 0.5 µs implementiert. Dieser Dipol wurde mit einem geringen Versatz von 0.01 mm zum Zentrum des Prokörpers aufgebracht. Die in den Prüfkörpern verwendeten Materialien und deren Eigenschaften sowie die Variation der Modellparameter sind im Detail in [9] beschrieben.

$$\begin{aligned}
 F(t) &= F_{max} \cdot (t/\tau) & t \leq \tau \\
 F(t) &= F_{max} - F_{max} \cdot 2(t - \tau)/\tau & \tau < t \leq 1.5\tau \\
 F(t) &= 0 & t > 1.5\tau
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

2. Ergebnisse und Diskussion

2.1 Quellenparameter

In den Abb. 2-4 sind die Frequenzparameter der simulierten Schallemissionssignale, die mit den Sensoren des Typs M31 aufgezeichnet werden, für die Variation spezifischer Quellenparameter dargestellt. Der Vergleich der Lage dieser simulierten Signale mit jenen aus den Experimenten an Miniaturzugprüfkörpern aus Vollholz wird im Abschnitt 2.3 diskutiert.

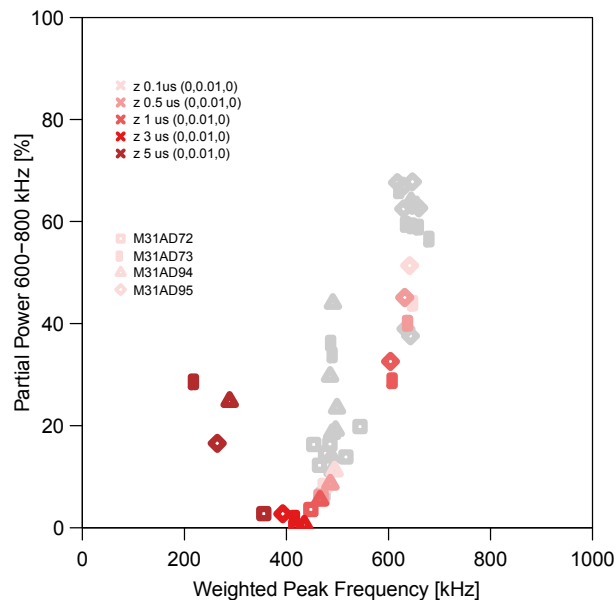


Abb. 2. Lage der simulierten Schallemissionssignale bzw. der entsprechenden Frequenzparameter für Dipolquellen in Vollholz als Funktion der Anstiegsdauer des Quellenmechanismus' und der unterschiedlichen Sensorcharakteristik (Sensortyp M31), graue Symbole entsprechen einer Anstiegszeit des Quellenmechanismus (Dipols) von $0.5 \mu\text{s}$ für unterschiedliche Quellenorte und Dipolorientierungen, farbige Symbole die Variation der Anstiegszeit für Quellen im Zentrum mit Dipolorientierung entlang der Belastungsachse.

Abb. 2 zeigt die Frequenzparameter (Leistungsspektrumsanteil Partial Power im Frequenzband 600-800 kHz bzw. gewichtete Spitzenfrequenz Weighted Peak Frequency) simulierter Signale für die Variation der Anstiegszeit der Quelle (zwischen 0.1 und $5 \mu\text{s}$, farbige Symbole) sowie den Einfluss unterschiedlicher Quellenorte und Dipolorientierung für eine Anstiegszeit von $0.5 \mu\text{s}$ (graue Symbole). Die Darstellung weist auf drei mögliche Signalcluster hin, einen bei einer gewichteten Spitzenfrequenz von 200-300 kHz, einer bei 400-500 kHz und einer oberhalb von 600 kHz. Diese Signallagen unterscheiden sich in dieser Darstellung teilweise auch durch die Anteile am partiellen Leistungsspektrum im Frequenzband zwischen 600 und 800 kHz. Diese Anteile hängen deutlich von der in der Simulation verwendeten Anstiegszeit der Dipolquelle ab, höhere Anstiegszeiten ($1-3 \mu\text{s}$) ergeben im Vergleich zu kürzeren ($<1 \mu\text{s}$) geringere Anteile im höher-frequenten Leistungsspektrum.

Abb. 3 und 4 zeigen in vergleichbarer Darstellung die Frequenzparameter simulierter Signale, bei denen anstelle der Anstiegszeit die Orientierung des Dipols (Abb. 3) bzw. die Tiefenlage des Dipols entlang der y-Achse (senkrecht zur Prüfkörperoberfläche, auf die die Sensoren gekoppelt wurden, Ursprung im Zentrum des Prüfkörpers, höhere y-Werte liegen näher bei der Oberfläche) variiert wurde. Für dieselbe Wahl der Frequenzparameter wie in Abb. 2 und einer Anstiegszeit von $0.5 \mu\text{s}$ ergeben sich je zwei Signalcluster mit unterschiedlichen Anteilen im Leistungsspektrum zwischen 600 und 800 kHz mit gewichteten Spitzenfrequenzen zwischen 400-500 kHz bzw. oberhalb von 600 kHz, ähnlich wie für die Variation der Anstiegszeit (Abb. 2), mit Ausnahme des Signalclusters zwischen 200-300 kHz, der in diesen Fällen nicht auftritt.

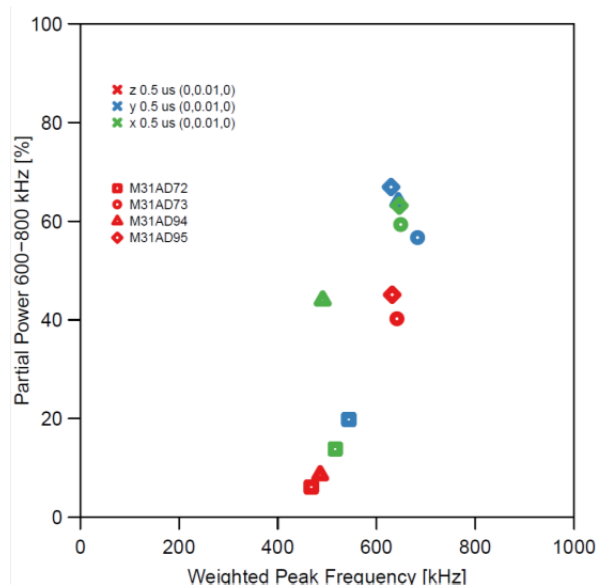


Abb. 3. Lage der simulierten Schallemissionssignale bzw. der entsprechenden Frequenzparameter für Dipolquellen in Vollholz für eine Anstiegszeit von $0.5 \mu\text{s}$ als Funktion der Orientierung des Quellenmechanismus' und unterschiedlicher Sensorcharakteristiken (Sensortyp M31).

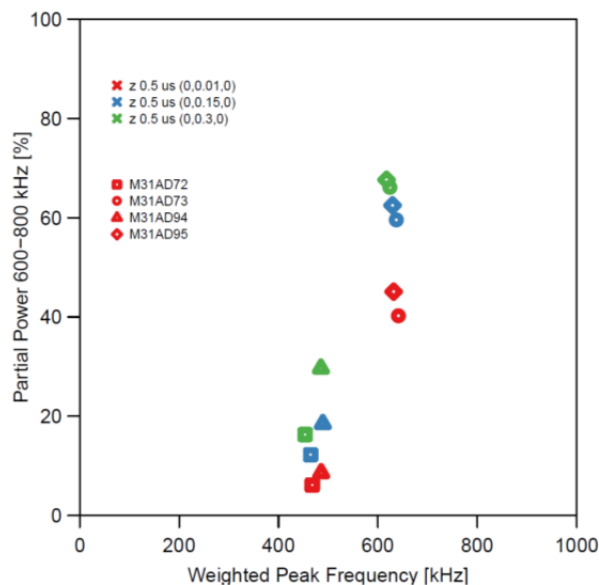


Abb. 4. Lage der simulierten Schallemissionssignale bzw. der entsprechenden Frequenzparameter für Dipolquellen in Vollholz für eine Anstiegszeit von $0.5 \mu\text{s}$ als Funktion der Tiefenlage der Quelle entlang der y-Achse (senkrecht zur Prüfkörperfläche mit den gekoppelten Sensoren) und unterschiedlicher Sensorcharakteristiken (Sensortyp M31).

Diese Signalcluster aus der Quellsimulation mit Variation der wesentlichen Parameter (Anstiegszeit, Dipolorientierung, Dipollage) soll nun mit den experimentellen Ergebnissen aus der Signalklassifizierung verglichen werden. Zuerst wird aber noch kurz der mögliche Einfluss der Transferfunktion der Messkette und speziell der Sensorcharakteristik diskutiert.

2.2 Sensoreigenschaften

In der Finite Element Modellierung werden grundsätzlich sämtliche Faktoren, welche die gemessenen Signale beeinflussen, berücksichtigt. Neben den Quellenparametern (Anstiegsdauer, Dipollage und Dipolorientierung) sowie den Signalausbreitungseffekten im anisotropen, inhomogenen Material (das entsprechend homogenisiert in die Simulation implementiert wurde), spielen auch die Sensoreigenschaften, speziell die frequenzabhängige Empfindlichkeit der Sensoren, eine wichtige Rolle.

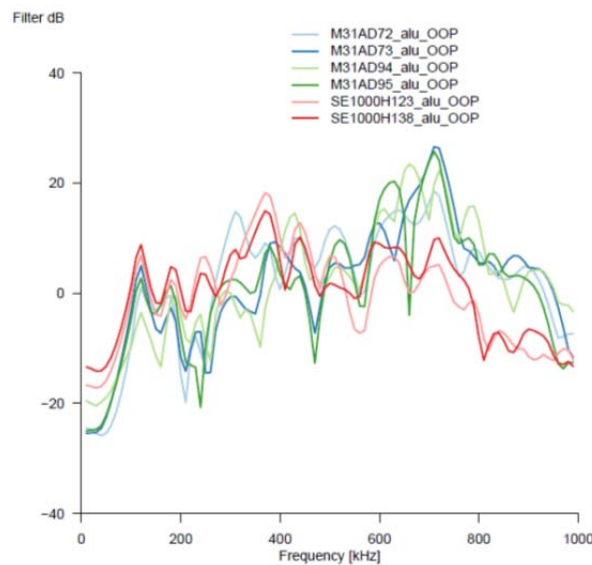


Abb. 5. Die aus einem Vergleich der Schallemissionssignale von Bleistiftminenbrüchen und von Simulation mittels FEM ermittelte Transferfunktion der Sensoren aus Bleistiftminenbrüchen senkrecht zur Plattenoberfläche, Vergleich der vier Miniatur Sensoren (Typ M31) und der zwei Breitbandsensoren (Typ SE-1000H).

Die Transferfunktion der verwendeten Sensoren (Typ M31) deutet darauf hin, dass bei Frequenzen zwischen 100 und 200 kHz, bei etwa 400 kHz sowie zwischen 600 und 800 kHz eine deutlich höhere Empfindlichkeit besteht, während sie bei Frequenzen um etwa 240 und 440 kHz deutlich niedriger ist. Dies kann möglicherweise die Frequenzanteile in den Signalen entsprechend gewichten und in der Auswertung der experimentell gemessenen Signale die Clusterlage beeinflussen. Beim momentanen Stand der Simulation (Abb. 2-4) wurden die in Abb. 5 dargestellten Transferfunktionen der Sensoren (Typ M31) verwendet. Die damit verbundene Streuung der Signalparameter ist in Abb. 2 bis 4 durch unterschiedliche Symbole in Farbe für je einen der vier Sensoren (Typ M31) dargestellt. Weitere Details dazu, speziell das Vorgehen bei der Ermittlung der Transferfunktion, werden in einer andern Publikation [13] vertiefter diskutiert.

2.3 Vergleich mit Signalklassifizierung aus Messungen

Entscheidend für die Interpretation der Signalcluster aus den Finite-Element Modellierungen ist der Vergleich mit den Clustern aus den Zugversuchen. Dese hatten, wie

in Abb. 6 für den Parameter PP4 (Frequenzband 600-800 kHz als Funktion der gewichteten Spitzenfrequenz (WPF) dargestellt, zwei Cluster von Signalen mit nieder- bzw. höherfrequenten Anteilen bei Werten der WPF von ca. 330 bzw. 600 kHz ergeben. Diese waren vorläufig „langsamen“ Separationsvorgängen zwischen Zellwandschichten in der Zellwand bzw. „schnellerer“ Separation der Zellwand (Zellwandrissen) zugeordnet worden [7].

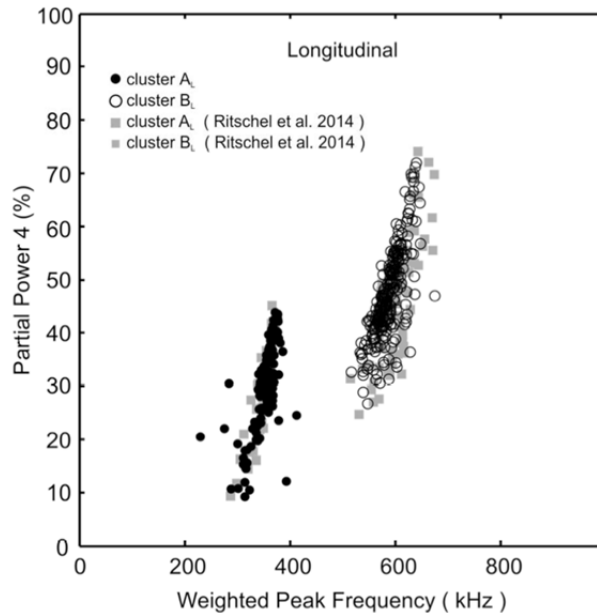


Abb. 6. Cluster aus Signalklassifizierung (Sensortyp M31) von Zugversuchen an Miniaturzugprüfkörpern aus Fichtenholz mit longitudinaler Orientierung (Fasern parallel zur Belastungsrichtung), die Cluster aus zwei unabhängigen Versuchsreihen weisen auf je einem Mechanismus mit nieder- bzw. höherfrequenten Anteilen (unterschiedliche gewichtete Spitzenfrequenz WPF) im Leistungsspektrum hin (Details siehe [8]).

3. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Signalklassifizierung von Schallemissionssignalen, die mit Miniatorsensoren (Typ M31) während der Zugbelastung bis zum Versagen von Miniaturzugprüfkörpern aus Fichtenholz aufgezeichnet worden waren, hatten zwei charakteristische Cluster mit Signalen mit einem höheren niederfrequenten bzw. höherfrequenten Anteil im Leistungsspektrum ergeben. Empirisch und mit Auswertung von Röntgen-Mikro-Computertomografie-Bildern nach Auftreten von Schädigung waren die den Clustern zugrunde liegenden Mechanismen als Separation zwischen Zellwandschichten einzelner Zellen bzw. Zellwandbrüche identifiziert worden. Im vorliegenden Beitrag wurde Finite-Element Simulation unterschiedlicher Quellenmechanismen und nachfolgende Klassifizierung der simulierten Signale zur Identifikation der Mechanismen untersucht. Der Vergleich der Signalklassifizierung aus den Experimenten mit jener aus der Simulation deutet darauf hin, dass die Anstiegszeit des Quellenmechanismus ein wichtiger Parameter ist, der zu den unterschiedlichen Frequenzkomponenten beiträgt. Dies ist prinzipiell mit der empirischen Zuordnung der Quellenmechanismen zu „langsamen“ und „schnelleren“ Bruch- oder Rissvorgängen [7] konsistent. Insbesondere wurde experimentell kein Cluster bei niedrigen Frequenzen (<200 kHz) beobachtet. Auf Basis der hiergezeigten Modellierungen würde ein solcher Cluster nur durch die langsamsten Quellen, d.h. die höchsten Anstiegszeiten zu erklären sein. Diese Beobachtung zeigt deutlich die Signifikanz dieses Einflusses auf die Entstehung der einzelnen Cluster. Im Vergleich dazu haben die anderen Quellenparameter, wie Orientierung und Tiefenlage keinen maßgeblichen Einfluss auf die Position der Cluster. Andererseits bleibt unklar, wie weit die individuelle Sensorcharakteristik (auch bei

nominell vergleichbaren Sensoren eines Typs) die Signalklassifizierung ebenfalls beeinflusst. Diese Frage wird in einem später publizierten Beitrag [13] weiter untersucht werden.

4. Dank

Diese Forschungsarbeiten wurden unter dem Projekt „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“ (Nr. 200021_127134) vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (SNF) im Rahmen der Dissertation von F.B. sowie von der „Research Foundation Flanders (FWO)“ durch ein Doktorandenstipendium für L.V. finanziell unterstützt.

Referenzen

- [1] A.J. Brunner, E. Hack, J. Neuenschwander: “Nondestructive Testing”, Chapter 13 in “Characterization and Analysis of Polymers”, (Ed. Arza Seidel) J. Wiley & Sons (ISBN 978-0-470-23300-9), 357-377 (2008).
- [2] J. Awerbuch: “On the identification of failure mechanisms in composite laminates through acoustic emission” in Acoustic Emission (Hsg. J. Eisenblätter), DGM Informationsgesellschaft, 47–58 (1998),
- [3] S. Barre, M.L. Benzeggagh: “On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fiber-reinforced polypropylene”, Composites Science and Technology, 52, No. 3, 369–376 (1994).
- [4] J. Bohse, T. Krietsch, J. Chen, A.J. Brunner: "Acoustic Emission Analysis and Micromechanical Interpretation of Mode I Fracture Toughness Tests on Composite Materials", Proceedings ESIS Conference on Fracture of Polymers, Composites and Adhesives (Eds. J.G. Williams, A. Pavan), ESIS Publication 27 (ISBN 0-08-043710-9), Elsevier, 15-26 (2000).
- [5] J. Bohse: “Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites”, Composites Science and Technology, 60, No. 8, 1213–1226 (2000).
- [6] 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)
- [7] 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).
- [8] F. Baensch: „Damage evolution in wood and layered wood composites monitored by in situ acoustic emission, digital image correlation and synchrotron based tomographic microscopy“, Institut für Baustoffe, ETH Zürich, Dissertation Nr. 22372, 186 pp. (2015).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] L.L. Vergeynst, A.J. Brunner, M.G.R. Sause: „FEM-Simulation von Schallemissionssignalen aus Zugversuchen an Miniaturprüfkörpern aus Fichtenholz für vergleichende Signalklassifizierung mittels Mustererkennung“, 20. Kolloquium Schallemission, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Vortrag 17, pp 1-8 (2015).