

FEM-Simulation von Schallemissionssignalen aus Zugversuchen an Miniaturprüfkörpern aus Fichtenholz für vergleichende Signalklassifizierung mittels Mustererkennung

Lidewei L. VERGEYNST¹, Andreas J. BRUNNER², Markus G. R. SAUSE³

¹ Universität Ghent, Laboratory of Plant Ecology, Ghent, Belgien

² Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, Schweiz

³ Universität Augsburg, Institut für Physik, Experimental-Physik II, Augsburg

Kurzfassung. Brüche bzw. Versagen in Holzstrukturen resultieren aus der Häufung mikroskopischer Schädigung, die mit Schallemissionsmessungen nachgewiesen werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Schädigungsmechanismen in Holz mittels Signalanalyse unterschieden werden können. Mustererkennung ergab zwei Signalklassen, die im Wesentlichen durch die gewichtete Spitzenfrequenz unterscheidbar waren. Die Signalklasse mit höherer Spitzenfrequenz konnte mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Zellwandbrüchen, jene mit niedriger Spitzenfrequenz Zellablösungen zugeordnet werden. Es wurde daher vermutet, dass die unterschiedliche Rissausbreitungsgeschwindigkeit die beobachteten Frequenzspektren ergab. Zur Verifikation dieser Hypothese wurden in einem Finite Element Modell unterschiedliche Quellen-Anstiegszeiten, Quellenorte und Quellenorientierungen systematisch untersucht. Die Anstiegszeit konnte als wahrscheinlich wichtigster Parameter für das Auftreten unterschiedlicher Frequenzspektren identifiziert werden. Allerdings spielt die Sensorempfindlichkeit als Funktion der Frequenz bei diesen Messungen ebenfalls eine wichtige Rolle beim Nachweis der Schädigungsmechanismen. Der Beitrag diskutiert dies an ausgewählten Beispielen.

Einführung

Schallemissionsanalyse ist als volumetrisches zerstörungsfreies Prüfverfahren wegen seiner hohen Empfindlichkeit und der gleichzeitig sehr hohen Zeitauflösung ideal für die Untersuchung mikroskopischer Schädigungsmechanismen bzw. des Schädigungsverlaufs in Materialien oder Strukturelementen unter statischen oder dynamischen Lasten (z.B. [1]). Allerdings ist die eindeutige Zuordnung der erfassten Schallemissionssignale zu spezifischen Quellenmechanismen schwierig [2,3], außer wenn durch Belastungsart, Form oder Material des Prüfobjekts ein einziger bestimmter Mechanismus auftritt oder die Schallemission dominiert. Ein Beispiel dafür sind bruchmechanische Prüfungen, bei denen ein bestehender Anriss gleichmäßig in eine vorgegebene Richtung weiterwächst [4]. Die Entwicklung und Anwendung von Mustererkennungs- bzw. Signalklassifizierungs-



Algorithmen kann Hinweise auf unterschiedliche Mechanismen liefern, erlaubt aber nicht deren eindeutige Identifikation. Dafür sind meist weitere Informationen notwendig. Ein Ansatz, der zur Identifikation der mikroskopischen Mechanismen führen kann, ist die Simulation der vom Sensor aufgezeichneten Schallemissionssignale unter Verwendung von Finite Element Modellen mit vereinfachten Signalquellen. Dieser Ansatz war für Faserverbundwerkstoffe entwickelt und durch Mustererkennung bzw. Klassifizierung der simulierten Signale und Vergleich der resultierenden Signalcluster mit denen aus den Experimenten validiert worden [5]. 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 nun auch auf Holzwerkstoffe übertragen [6]. Wie in [3] gezeigt, spielt die Sensorcharakteristik in diesem Verfahren eine wichtige Rolle. Dieser Aspekt wird im vorliegenden Beitrag im Detail diskutiert.

1. Material und Methodik

1.1 Miniaturzugprüfkörper aus Fichtenholz und Schallemissionsmessungen

Die Miniaturzugprüfkörper wurden aus Fichtenholz (*Picea abies* [L.] Karst.) in zwei Orientierungen hergestellt, einerseits mit longitudinaler Ausrichtung, d.h. parallel zur Belastungsrichtung, andererseits mit radialer Orientierung, d.h. die Jahrringe senkrecht zur Belastungsrichtung. Weitere Details dazu sind in [6,7] beschrieben. Die Zugbelastung wurde mittels einer Belastungsvorrichtung mit einer Messzelle von 1 kN aufgebracht, die sowohl im Labor wie auch in für Synchrotron-basierte Röntgen-Tomografie genutzt werden konnte [8].

Die Schallemissionsmessungen erfolgten mit Miniatursensoren (Typ M31 von Fuji Ceramics Corp., Japan), mit einem Gerät (Typ AMSY-6 von Vallen Systeme GmbH) mit einer Erfassungsrate von 10 MHz. Dabei wurden Vorverstärker mit Frequenzbandpass von 30 kHz und 1'000 kHz und einer Verstärkung von 34 dB (Typ AEP3 von Vallen Systeme GmbH) sowie mit digitalen Frequenzfiltern von 25 kHz (Hochpass) und 960 kHz (Tiefpass) im Datenerfassungs kanal benutzt. Die Filter im Vorverstärker sind 9. Ordnung mit 54dB/Oktave für den Hochpass und 5. Ordnung mit 30 dB/Oktave für den Tiefpass.

1.2 Frequenzparameter der Schallemissionssignale und Finite Element Simulation

Der Ansatz zur Finite-Element Simulation der Schallemissionssignale der Miniaturzugprüfkörper aus Fichtenholz ist in früheren Beiträgen [3,9] beschrieben. Aus den simulierten Signalen werden Frequenzparameter ermittelt und mit jenen der gemessenen Signale verglichen. Für die experimentell gemessenen Signale wurde ein möglicher Einfluss der Sensorempfindlichkeit als Funktion der Frequenz auf die aus der Signalklassifizierung resultierenden Cluster festgestellt [3]. Dieser Aspekt wird im vorliegenden Beitrag dargestellt und diskutiert.

2. Ergebnisse und Diskussion

2.1 Sensorcharakteristik und Bleistiftminenbrüche

Abb. 1 zeigt die vom Lieferanten der Schallemissionssensoren bestimmte Sensorempfindlichkeit für zwei Sensoren des Typs M31. Während der Verlauf der zwei Kurven etwa

vergleichbar ist (Variation von weniger als ± 5 dB um einen Mittelwert von ca. 77 dB zwischen etwa 300 und 1100 kHz), sind doch Unterschiede, vor allem bei der Frequenz von Leistungsspitzen zwischen den zwei Sensoren, feststellbar (z.B. Maximum der Empfindlichkeit bei etwa 800 bzw. 740 kHz). Der Einfluss dieser Variation auf die Signalklassifizierung wurde mittels Bleistiftminenbrüchen auf einer Aluminiumplatte, einem einfach zu modellierenden System, untersucht. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 2 dargestellt. Ergänzend wurden damit auch Breitbandsensoren (Typ SE-1000H von Dunegan Engineering Corp.) untersucht, da diese bei Zugversuchen an Holzprüfkörpern im Labormaßstab verwendet worden waren [6]. Abb. 3 zeigt beispielhaft ein Schallemissionsignal und die Frequenzspektren der Bleistiftminenbrüche normal und in der Ebene der Aluminiumplatte (380 mm x 400 mm x 6 mm), die von den Sensoren des Typs M31 aufgezeichnet wurden.

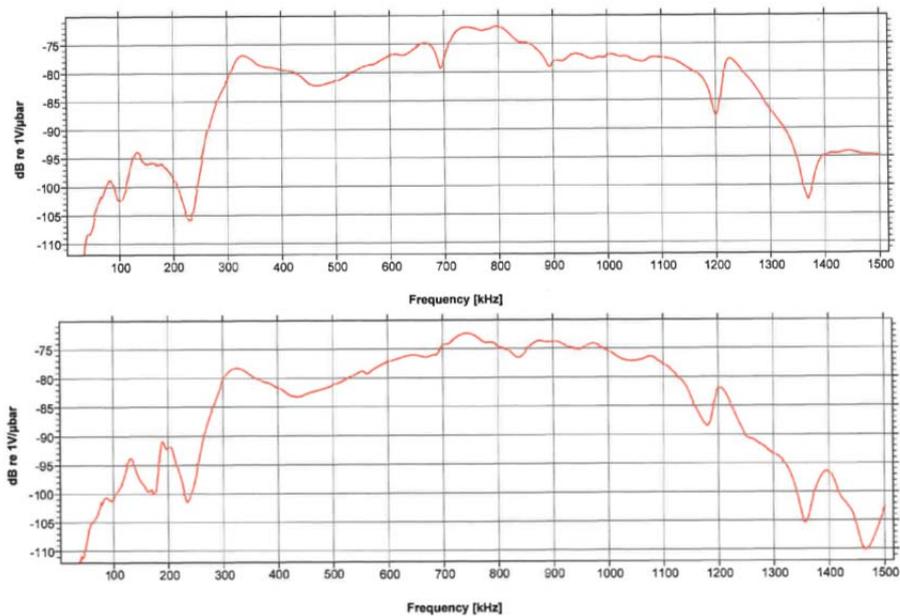


Abb. 1. Empfindlichkeitskurven in Funktion der Frequenz zweier Miniatorsensoren des Typs M31.



Abb. 2. Bleistiftminenbrüche auf einer Aluminiumplatte zwecks Vergleich simulierter mit gemessenen Signalen für die Miniatorsensoren des Typs M31 (links) Bleistiftminenbrüche auf der Aluminiumplatte, d.h. Auslenkung normal zur Plattenebene und (rechts) auf der Kante, d.h., Auslenkung in Plattenebene.

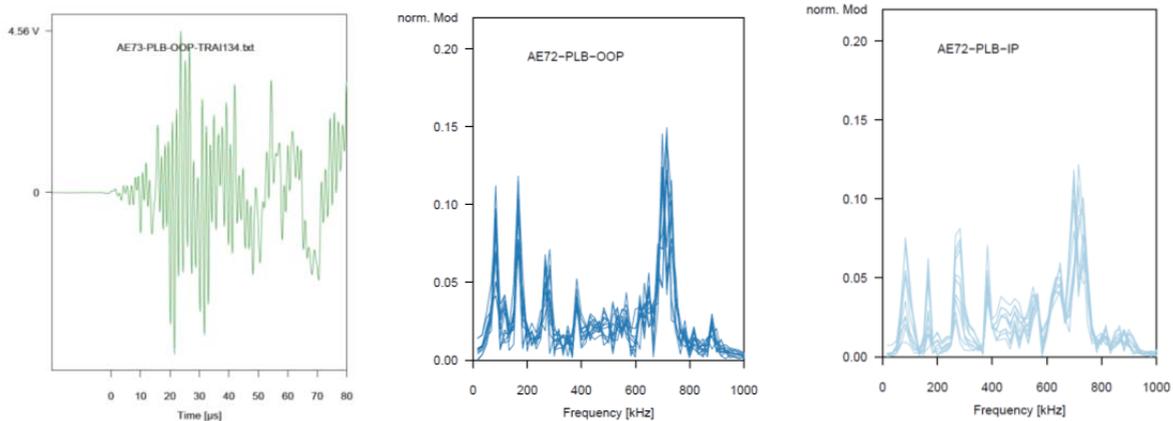


Abb. 3. Beispiele (links) eines Bleistiftminenbruchsignals (Sensortyp M31) auf der Aluminiumplatte mit Auslenkung normal zur Plattenebene und Frequenzspektren von Bleistiftminenbrüchen aufgezeichnet mit den verwendeten Sensoren des Typs M31 (Mitte) mit Auslenkung normal zur Plattenebene und (rechts) und in der Ebene der Aluminiumplatte.

2.2 Finite-Element Simulation der Bleistiftminenbrüche

Für die Finite-Element Simulation der Bleistiftminenbrüche wurde die Aluminiumplatte (effektiv 380 mm x 400 mm x 6 mm) durch Verwendung von Symmetrierandbedingungen und Flächen ohne Rückreflektion des Signals (sogenannte „low-reflecting boundaries“) auf 50 mm x 23 mm x 6 mm reduziert. Zur Modellierung des Bleistiftminenbruchs wurde eine Kraframpe definiert, die innerhalb einer Anstiegszeit t_e ein Kraftmaximum $F_{\max} = 1 \text{ N}$ erreicht:

$$F(t) = \begin{cases} F_{\max} \cdot (t/t_e) & t \leq t_e \\ F_{\max} & t > t_e \end{cases} \quad (1)$$

Wie in [10] gezeigt erlaubt dies eine hinreichend genaue Abbildung der Quellfunktion des Bleistiftminenbruch. Alle Berechnungen wurden innerhalb des „structural mechanics moduls“ der Softwareumgebung Comsol Multiphysics durchgeführt. Das Modell verwendet eine Rechennetauflösung von 0.01-1.0 mm und einen Rechenschritt von 0.1 μs zur Berechnung der Signalausbreitung.

Die experimentellen Signale wurden wie die simulierten nur für die ersten 300 Abtastpunkte („samples“), d.h. die ersten 30 μs ab der Nachweisschwelle ausgewertet, die restlichen Samples bis 1‘000 Punkte wurden mit Nullen gefüllt. Aus diesen Signalen wurde dann das Leistungsspektrum für beide Signaltypen (gemessen bzw. simuliert) berechnet. Das Verhältnis zwischen simuliertem und experimentellem Leistungsspektrum ergibt dann die Transferfunktion der verwendeten Messkette (Abb. 4) in Analogie zur Vorgehensweise in [11]. Die Grafik zeigt für die einzelnen Sensoren die Variation der Empfindlichkeit und die daraus abgeleitete Variation der Transferfunktion jedes Sensors als Funktion der Frequenz. Die Miniaturesensoren (Typ M31) zeigen eine gewisse erhöhte Empfindlichkeit in bestimmten Frequenzbereichen und somit nur angenähert eine Breitbandcharakteristik.

Diese Frequenzspitzen in der Sensorcharakteristik können einen Einfluss auf die Ergebnisse der Signalklassifizierung haben. Im Mittel der gemessenen Sensoren des Typs M31 liegen diese Frequenzspitzen bei etwa 100-200 kHz, um 400 kHz und zwischen 600-800 kHz. Dies sind Frequenzbereiche, in denen auch die gewichtete Spitzenfrequenz (Englisch weighted peak frequency, WPF, siehe [5-7] für die Definition dieser Grösse) der meisten Cluster der Signalklassifizierung liegt. Andererseits gibt es für die Sensoren des Typs M31 in Funktion der Frequenz auch deutlich erkennbare Minima in der

Empfindlichkeit (Abb. 4), z.B. bei etwa 240 kHz, 460 kHz und etwa 670 kHz. Für die Sensoren des Typs SE-1000H ergeben sich ähnliche, wenn auch etwas weniger ausgeprägte Maxima bzw. Minima.

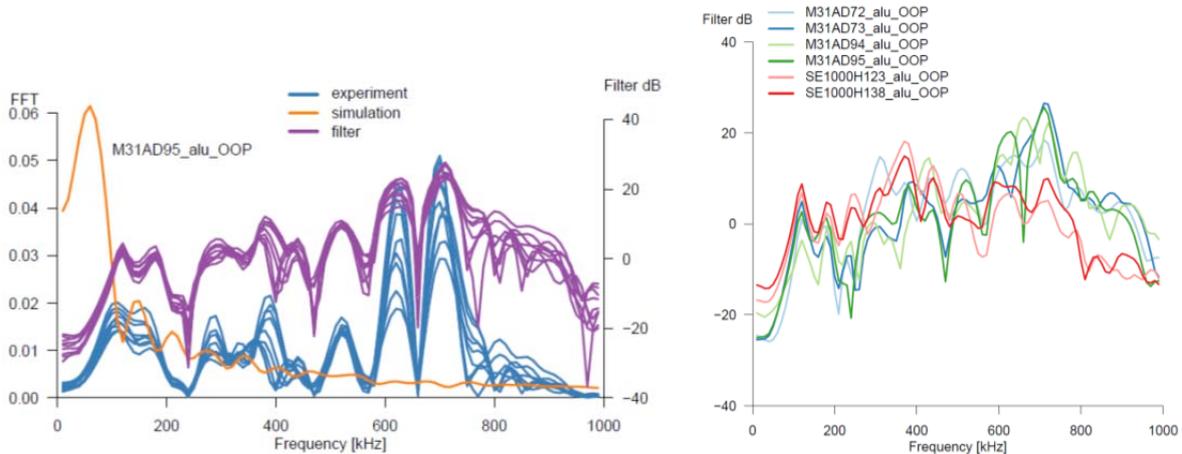


Abb. 4. Die aus einem Vergleich der Schallemissionssignale von Bleistiftminenbrüchen und von Simulation mittels FEM Signalen ermittelte Transferfunktion der Messkette, (links) alle Bleistiftminenbrüche für einen Miniatursensor (Typ M31, Seriennummer. AD95) aus Bleistiftminenbrüchen senkrecht zur Plattenoberfläche, (rechts) Vergleich von vier Miniatursensoren (Typ M31) und zwei Breitbandsensoren (Typ SE-1000H).

Dieselbe Simulation wurde auch für Bleistiftminenbrüche, die an der Kante der Aluminiumplatte, d.h. in der Plattenebene aufgebracht wurden, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt. In den zwei dargestellten Grafiken wurde die Abweichung des Bleistiftminenbruchs von der Mittellage der Platte variiert. In der Grafik links betrug die Abweichung 0.1 mm, in jener rechts 0.25 mm.

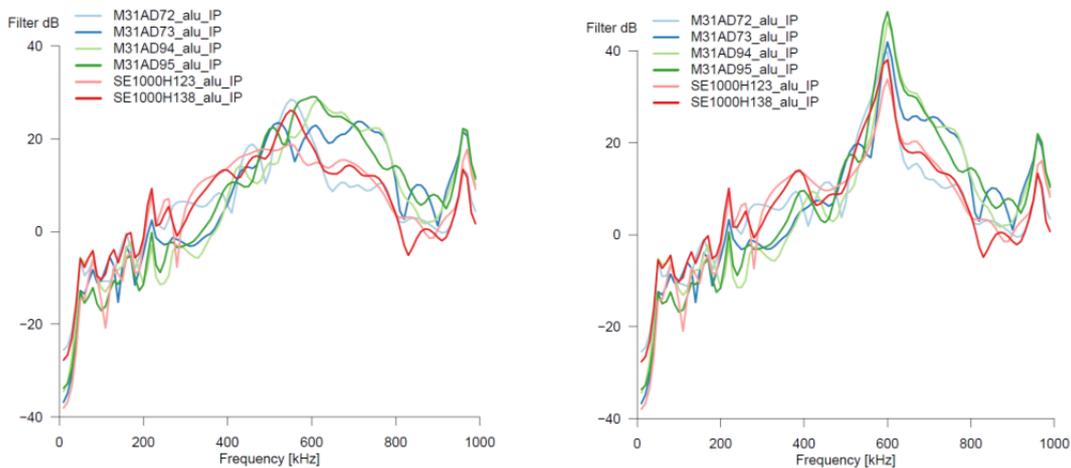


Abb. 5. Die aus einem Vergleich der Schallemissionssignale von Bleistiftminenbrüchen und von Simulation mittels FEM Signalen ermittelte Transferfunktion für vier Miniatursensoren (Typ M31) und zwei Breitbandsensoren (Typ SE-1000H) aus Bleistiftminenbrüchen an der Kante der Aluminiumplatte, d.h., in Plattenebene, (links) für eine Abweichung von der Mittellage um 0.01 mm, (rechts) für eine Abweichung aus der Mittellage von 0.25 mm.

Der Vergleich der Transferfunktion aus Bleistiftminenbrüchen senkrecht zur Plattenebene mit jener aus Bleistiftminenbrüchen in Plattenebene zeigt signifikante Unterschiede im Frequenzverlauf. Dies führt zur Frage, ob dieser Ansatz über Simulation und Messung der Bleistiftminenbrüche wirklich die effektive Transferfunktion für die an

die Aluminiumplatte gekoppelten Sensoren genügend genau beschreibt. Für die Anwendung dieser Transferfunktion auf die Miniaturprüfkörper aus Vollholz können weitere Effekte, z.B. von unterschiedlicher Kopplung an Holz im Vergleich zum Aluminium nicht ausgeschlossen werden.

Es muss hier dazu bemerkt werden, dass die Kante der Aluminiumplatte, die aus einer größeren Platte herausgeschnitten worden war, nicht speziell bearbeitet oder poliert worden war. Die durch das Schneiden verursachte Oberflächenrauigkeit der Kante führte dazu, dass der Ort des Bleistiftminenbruchs um einige Zehntel Millimeter (geschätzt bis zu 0.5 mm) von der Mittellage abweichen konnte. Der Vergleich der Simulation für zwei unterschiedliche Abweichungen von der Mittellage zeigt, dass bereits Abweichungen von wenigen Zehntel Millimeter zu signifikanten Unterschieden in der Transfercharakteristik der verwendeten Sensoren führen. Wie weit die Oberflächenrauigkeit durch Reflexionen in den durch Bleistiftminenbrüche erzeugten Signalen zu Interferenzen bzw. zusätzlichen Frequenzkomponenten führen kann, ist nicht klar. Für weitere Versuche wäre zu überlegen, ob der Punkt, auf dem die Bleistiftmine für den Bruch aufgesetzt werden soll, eventuell durch eine Markierung bzw. geeignet hergestellte, leichte Vertiefung hervorgehoben werden soll, um eine genügende Reproduzierbarkeit des Quellenorts zu erreichen. Bei einigen Bleistiftminenbrüchen sind auch die Bruchstücke der Mine auf der Oberfläche der Aluminiumplatte aufgetroffen, durch die Wahl der relativ kurzen Signaldauer (30 μ s) für die Auswertung sind aber dadurch erzeugte Interferenzen praktisch ausgeschlossen.

2.3 Frequenzparameter der simulierten Signale für Miniaturzugprüfkörper aus Holz

Abb. 6 zeigt, dass die Frequenzlage der für die Versuche an Miniaturprüfkörpern aus Vollholz simulierten Signale [3] von der Anstiegsdauer des angenommenen Quellenmechanismus' abhängt. Die Frequenzparameter der Simulation (Partial Power 600-800 kHz als Funktion der gewichteten Spitzenfrequenz WPF) sind für unterschiedliche Anstiegszeiten des Quellenmechanismus (farbige Symbole, Variation der Anstiegszeit von 0.1 bis 5 μ s), aber auch für unterschiedliche Quellenorte und Dipolorientierungen (graue Symbole, für eine konstante Anstiegszeit von 0.5 μ s) dargestellt. Diese Ergebnisse werden in [3] im Detail mit den experimentellen Signalclustern verglichen und diskutiert.

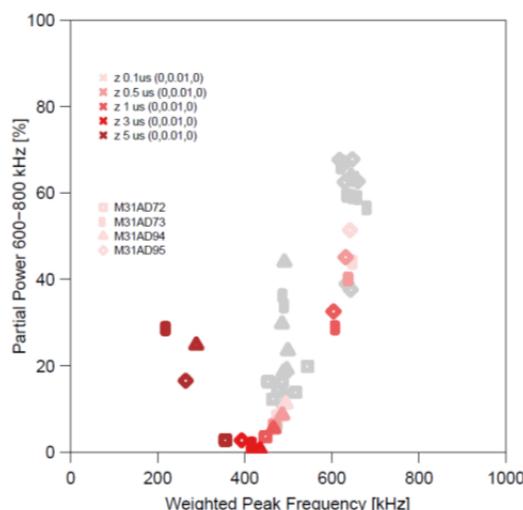


Abb. 6. Darstellung der Frequenzparameter simulierter Signale für die Miniaturprüfkörper aus Holz für den Sensortyp M31, diese wurden mit der Transferfunktion aus Bleistiftminenbrüchen senkrecht zur Aluminiumplatte bestimmt, graue Symbole entsprechen einer Anstiegszeit des Quellenmechanismus (Dipols) von 0.5 μ s, aber für unterschiedliche Quellenorte und Dipolorientierungen, die farbigen Symbole die Variation der Anstiegszeit für Quellen im Zentrum mit Dipolorientierung entlang der Belastungsachse.

Eine kürzere Anstiegsdauer führt für die gewählten Frequenzparameter zu deutlich höheren Leistungsspektrumsanteilen. Tendenziell ergibt eine längere Anstiegsdauer des Quellenmechanismus‘ auch eine etwas niedrigere gewichtete Spitzenfrequenz. Dies ist konsistent mit der Annahme, dass die im Experiment beobachteten Signalcluster mit nieder- und höher-frequenten Signalanteilen auf entsprechend „langsamere“ und „schnellere“ Mechanismen zurückzuführen sind (siehe [6,7] für eine ausführliche Diskussion dazu). Ebenfalls erkennbar ist die Streuung der Lage der Signale der einzelnen Sensoren (alle Typ M31) innerhalb des Clusters für einen vorgegebenen Wert der Anstiegsdauer. Diese intrinsische Streuung könnte sicher reduziert werden, wenn immer derselbe Sensor für die Messung der Signale verwendet wird (so lange sich dessen Sensorcharakteristik nicht ändert).

3. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Simulation von typischen Quellenmechanismen für Schallemissionssignale von Zugversuchen in Vollholzprüfkörpern mittels der Finite Element Methode und des Einflusses der Lage, Orientierung und Anregungszeit dieser Mechanismen zeigte sich ein möglicher Einfluss der Sensoreigenschaften, speziell der frequenzabhängigen Empfindlichkeit (Transferfunktion) auf die daraus resultierenden Signalcluster. Im vorliegenden Beitrag wurden diese Sensoreffekte vertieft untersucht. Die Sensorempfindlichkeit nominell identischer Sensoren kann bezüglich Frequenzlage wie auch Magnitude von Maxima und Minima gewisse Unterschiede aufweisen. Diese können die Lage gemessener Schallemissionssignale in Signalclustern aus Signalklassifizierungsalgorithmen beeinflussen. Für entsprechende Simulationen ist eine experimentelle Bestimmung der Sensorempfindlichkeit, z.B. mittels Bleistiftminenbrüchen an Modellsystemen (hier eine dünne Aluminiumplatte) oder die Verwendung einer aktuell gemessenen Sensorempfindlichkeitskurve sinnvoll. Allerdings resultierten für unterschiedliche Anregungen, d.h. Bleistiftminenbrüche senkrecht zur Plattenebene bzw. in der Plattenebene keine konsistenten Transferfunktionen für die verwendeten Sensoren. Die Ursache dafür könnte in der Anregung der unterschiedlichen Wellenmoden liegen. Falls die Bestimmung des Signalbeginns der 30 μs „samples“ der verwendeten Signale sich durch Signalrauschen oder die relativ breitbandigen Frequenzkomponenten der simulierten Signale unterscheidet, ist denkbar, dass gewisse Wellenmoden nicht erfasst wurden. Neben den bereits erwähnten, möglichen Unterschieden zwischen der Kopplung an Aluminium und Holz resultieren je nach Anregung und Auswertung daraus ebenfalls eventuell unterschiedliche Transferfunktionen.

4. Dank

Diese Arbeit wurde zum Teil von der „Research Foundation Flanders (FWO)“ durch ein Doktorandenstipendium für L.V. unterstützt.

Referenzen

- [1] “Acoustic Emission Testing”, in ASNT Handbook of Nondestructive Testing, Vol. 6 (3rd edn.), (Eds. R.K. Miller, E. Hill, P.O. Moore), American Society for Nondestructive Testing (2005).
- [2] J. Bohse: “Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites”, Composites Science and Technology, 60, No. 8, 1213–1226 (2000).

- [3] 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 (2015).
- [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] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [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] M.G.R. Sause: "Investigation of Pencil Lead Breaks as Acoustic Emission Sources", Journal of Acoustic Emission, 29, 184-196 (2011).
- [11] M.G.R. Sause, M.A. Hamstad, S. Horn: "Finite Element Modeling of Conical Acoustic Emission Sensors and Corresponding Experiments", Sensors & Actuators: A. Physical 184, 64-71, (2012).