



## Doctoral Thesis

# **Damage evolution in wood and layered wood composites monitored in situ by acoustic emission, digital image correlation and synchrotron based tomographic microscopy**

**Author(s):**

Baensch, Franziska

**Publication Date:**

2015

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010411928> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**Damage evolution in wood and layered wood  
composites monitored in situ by acoustic  
emission, digital image correlation and  
synchrotron based tomographic microscopy**

A thesis submitted to attain the degree of

**DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH**

(Dr. Sc. ETH Zurich)

presented by

**Franziska Baensch (nee Ritschel)**

**Dipl. Ing., TU Dresden**

born 01/05/1983

citizen of

Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. P. Niemz, ETH Zurich, examiner

Prof. Dr. habil. I. Burgert, ETH Zurich, co-examiner

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Geophys. C. U. Große, TU Munich, co-examiner

Dr. phil. II A. J. Brunner, Empa Dübendorf, co-examiner

## **Abstract**

Wood is one of the oldest building materials in the world, however some recent construction materials are also based on wood, such as Laminated Veneer Lumber (LVL). Bearing in mind the changes in fire regulations that now allow the construction of multi-level wooden buildings, wood products such as plywood, cross laminated timber (CLT), LVL or oriented strand board (OSB), are becoming increasingly more important in construction. To avoid critical situations and to maintain safety standards when applying wood based materials, more detailed information on damage accumulation and interaction is required for adequate design and durable implementation of wood materials in load bearing elements in building constructions.

Compared with solid wood, there is still limited knowledge on damage and failure mechanisms in these materials, especially at the microscopic scale. The damage progress in wood involves several length scales of the wooden hierarchical structure, complying with the growth rings at the mesoscopic scale, that occur on account of the composition of chemical constituents and the arrangement of cell types and cell wall structures at the microscopic level. In the case of the plywood, which is focused on in the studies presented here, the failure behavior differs from that of solid wood due to the additional length scale introduced by the layered structure of bonded veneers. Thus, the material behavior is mainly influenced by the orientation of the veneers as well as the used adhesive.

The detailed behavior of these materials under load, with the complex interactions between size and properties of the microstructural units, their interfaces, and the micro-and mesoscopic stress distributions yielding the observed macroscopic failure, is focused on. To this aim, the tensile failure of several plywood materials consisting of three up to six layers was monitored by the Acoustic Emission (AE) method, which provides high time-resolution ( $\mu\text{s}$  - ms) for damage initiation and accumulation on all length-scales. AE is the phenomenon of generating transient or continuous elastic waves by releasing stored elastic energy in materials by means of, e.g., plastic deformation or crack propagation, and hence, the detection of AE by means of piezo-electric sensors mounted on the material's surfaces facilitates recording multi-scale information on damage progress covering almost the whole specimen volume. Furthermore, to facilitate the interpretation of the AE results, the specimen's surfaces were monitored by CCD cameras for post-calculations of strain field formations by applying the method of digital image correlation (DIC).

Compared to the damage accumulation in solid spruce, a more distinctive exponential increase in damage growth was determined for the plywood materials. Hence, it is demonstrated that the destruction of plywood undergoes two damage growth rates clearly generated by the layered structure. The first damage growth rate is mainly restricted to the single layers releasing only about 30% of the total fracture energy, whereby the defect growth is larger the more layers constitute the plywood structure. Furthermore, a larger number of defects occurring during the first defect growth rate are found to predict a higher tensile strength of the material. The second rate of defect growth starting at about 70% of the ultimate stress indicates the path of lowest resistance sought through all layers.

The comparison of model layered wood made of clear spruce lamella and industrially produced plywood comprising to process-related pre-damages (lathe checks) has proven that the presence of pre-damages decreases the detected amount of AE. Besides, the model layered wood reveals a relatively higher share of microscopic scale damages than the industrial plywood materials.

Furthermore, the unsupervised pattern recognition (UPR) method for frequency based AE signal classification, originally developed for fiber-reinforced composite laminates, was applied to wood and layered wood materials for the first time. This implementation is straightforward, since these composites and wood both have distinct microstructures with anisotropic elastic properties. Firstly, to validate this cluster technique, tensile tests on miniature specimens made of spruce wood were monitored by AE and, simultaneously, by synchrotron radiation micro computed tomography (SR $\mu$ CT). Analogous to the different grain orientation of the veneers in the plywood, stress was applied parallel and perpendicular to the grain. By means of the UPR method, two classes of AE signals were identified, whereby one class of AE signals is characterized by a relatively high share of low frequency components and the opposite is true for the second class. Correlations of this cluster formation with the details of the crack propagation extracted from the SR $\mu$ CT tomograms led to the hypothesis that the signature of relatively slow cell separation mechanisms and rapid cell wall cracks might be the origin. The same tests were performed on bonded miniature specimens that consist of two clear spruce wood lamellae joined together, which yielded similar cluster results that were also assigned to separation mechanisms and cell wall cracks. A third cluster exclusively attributed to the failure in the adhesive layers was not identified. However, based on the combination of SR $\mu$ CT images and related AE cluster patterns, it is assumed that AE signals generated by crack mechanisms of the adhesive might be among the signals of the low frequency

cluster assigned to separation mechanisms. This may also be true for the laboratory scale specimens made of model layered wood and industrial plywood, since the UPR technique subsequently applied to the AE detected while tensile testing the different layered structures of plywood also yielded only two AE signal clusters. Similar to the results of the miniature tests, the clusters differ in signals of relatively high shares of low frequency and high frequency content and are thus assumed to also be caused by separation or by shear mechanisms and cell wall cracks, respectively, which essentially occur over the whole test duration. Furthermore, the broad range in AE energy of the detected events over the whole test duration proves that multi-scaled damages are present during both damage growth rates.

The knowledge gained on the microscopic as well as on the mesoscopic scale failure behavior and fracture pattern for different layered plywood materials enables an improved understanding of the complex interactions between dimension and function of the structural elements for failure evolution. Beside further clarification of the damage micromechanics of wood-based materials, new advances in test and monitoring methodology and in experimental characterization, analysis and evaluation were obtained, regarding the combination of AE and SR $\mu$ CT monitoring as well as adaptation of the new UPR approach.

## Zusammenfassung

Holz ist einer der ältesten Baustoffe der Welt und zugleich der Rohstoff für noch junge, neu entwickelte Materialien wie beispielsweise dem Furnierschichtholz „Laminated Veneer Lumber“ (LVL). Seit im Rahmen der europäischen Harmonisierung der Bauvorschriften die Brandschutzvorgaben Änderungen unterliegen, erleben insbesondere holzbasierte Baustoffprodukte wie Sperrholz, „Cross laminated timber“ (CLT), LVL und „Oriented Strand Board“ (OSB) einen Aufschwung im Bausektor. Um kritische Situationen zu vermeiden und die Sicherheit bei der Verbauung von Holzwerkstoffen gewährleisten zu können, ist es unerlässlich deren Schädigungsverhalten, die Ausbildung, Ansammlung und Wechselwirkung auftretender Schädigungen im Detail zu kennen. Nur so können spezialisierte Produkte für Konstruktionen entwickelt und die Tragfähigkeit lasttragender Holzelemente verbessert werden.

Verglichen mit dem umfangreichen Kenntnisstand zum Verhalten von Vollholz, besteht für viele Holzwerkstoffe noch Aufklärungsbedarf, insbesondere hinsichtlich des Schädigungsverlaufs im mikroskopischen Bereich. Bedingt durch die hierarchische Struktur, erfolgt die Schadensausbildung im Vollholz auf verschiedenen Größenskalen, beispielsweise an den Jahrringsgrenzen (mesoskopische Ebene) wo verschiedene Zelltypen (mikroskopische Ebene) einen Schwachpunkt in der Struktur darstellen können. Bei Holzwerkstoffen wird das Materialverhalten zusätzlich beeinflusst durch die Holzpartikelgröße, Ausrichtung und Anteil an verarbeitetem Holz sowie Bindematerial und Klebstoff. Im Falle des hier schwerpunktmäßig untersuchten Furnierwerkstoffes Sperrholz, sind die Furniere, deren Faserorientierung und Qualität sowie der verwendete Klebstoff von Bedeutung.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Versagensentwicklung von Sperrholz unter Belastung detailliert zu beschreiben. Dabei werden die komplexen Wechselwirkungen zwischen Größe und Funktion der mikro-strukturellen Elemente und deren Grenzflächen untersucht und die zum makroskopischen Versagen führenden mikro- und mesoskopischen Spannungsverteilungen analysiert. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Sperrholzmaterialien, bestehend aus drei bis sechs Furnierlagen, auf Zug bis zum endgültigen Versagen belastet und die auftretende Schallemission (AE, *aus dem Engl.: Acoustic Emission*) gemessen. Das Phänomen AE ist die Ausbreitung transientser und kontinuierlicher elastischer Wellen im Material, welche beispielsweise durch plastische Verformungen oder Rissbildung verursacht werden. Mit Hilfe von piezoelektrischen Sensoren, die auf der Materialoberfläche befestigt werden, sind

diese Wellen detektierbar. Auf diese Weise wird die mehrskalige, über das gesamte Probenvolumen auftretende Schadensausbildung und -ansammlung, in hoher Zeitauflösung (ms- $\mu$ s) erfasst. Da die Informationen aus der AE schwer zu interpretieren sind, wurden die Probenoberflächen während der Belastungstests zusätzlich mit CCD Kameras aufgenommen. Die generierten Bilder, nachträglich mittels Digitaler Bildkorrelation (DIC, aus dem Engl.: *Digital Image Correlation*) ausgewertet, liefern die Dehnungsfelder an der Probenoberfläche.

Während Vollholz eine eher lineare Schadensansammlung unter fortschreitender Belastung aufweist, wurde für die untersuchten Sperrhölzer ein exponentieller Zuwachs an Schädigungen festgestellt. Dementsprechend konnten für Sperrhölzer zwei Defekt-Zuwachsraten bestimmt werden, die eindeutig auf den Einfluss der Lagenstruktur zurückzuführen sind. Die erste Defekt-Zuwachsrate wird hauptsächlich durch die Schwachstellen in den einzelnen Lagen verursacht, wobei etwa 30% der insgesamt auftretenden Bruchenergie (anhand der Korrelation zwischen Bruchenergie und Energie der AE Signale ermittelt) freigesetzt wurden. Eine größere erste Defekt-Zuwachsrate korreliert tendenziell mit einer höheren Festigkeit, und ermöglicht somit eine grobe Vorhersage zur Materialfestigkeit. Die zweite Defekt-Zuwachsrate setzt bei etwa 70% der maximalen Last ein, wobei dann der Weg des geringsten Widerstandes „global“ über alle Lagen des Sperrholz-Prüfkörpers gesucht wird. Gegenüber dem „idealisierten“ Lagenholz, welches aus fehlerfreien, auf-Dicke-gehobelten Fichtenholzlamellen hergestellt wurde, generierte das industriell gefertigte Sperrholz mit seinen typischen, verarbeitungsbedingten Vorschädigungen (Schälrisse) eine niedrigere Anzahl AE Signale. Es wurde festgestellt, dass der Schadensverlauf im idealisierten Lagenholz einen vergleichsweise hohen Anteil an mikroskopischen Schäden aufweist.

Mit Hilfe eines Ansatzes zur Mustererkennung wurden die gemessenen AE Signale klassifiziert. Die verwendete Methode wurde ursprünglich für Untersuchungen an polymeren Faserverstärkten Verbundwerkstoffen (FVW) entwickelt. Es werden ausschließlich frequenzbasierte Parameter der AE Signale ausgewertet. Für die Grundlagenforschung in der Holzwissenschaft wird die Implementierung dieser Mustererkennungsmethode als vielversprechend bewertet, schließlich weisen FVW und Holz bzw. Holzwerkstoffe starke Ähnlichkeiten bezüglich dem Zusammenhang zwischen Struktur und Funktion sowie den daher rührenden anisotropen Eigenschaften auf. Um die Methode für Holz zu validieren, wurden zunächst Miniatur-Prüfkörper aus Fichtenholz geprüft und die AE gemessen. Gleichzeitig wurden die Prüfkörper mittels Synchrotron-Strahl-basierter Mikro-Computer-

Tomographie (SR $\mu$ CT) untersucht. Die Mustererkennung identifizierte zwei Klassen von AE Signalen, wobei eine Signalklasse durch eher niedrige Frequenzanteile, die zweite Signalklasse durch überwiegend höhere Frequenzanteile charakterisiert ist. Die Ergebnisse der Mustererkennung wurden durch detaillierte Auswertungen der zugehörigen SR $\mu$ CT-scans ergänzt, beispielsweise durch Analysen der entstandenen Risse und Bruchflächen. Es konnte eine erste Hypothese aufgestellt werden, welche den Ursprung der zwei Signalklassen zum einen mit den eher langsamen Vorgängen der Zell-Separation und zum anderen mit den spröden Zellwandrissen erklärt. Die gleichen Untersuchungen wurden an weiteren Miniatur-Prüfkörpern durchgeführt, welche aus zwei miteinander verklebten Fichtenholzlamellen bestanden. Die Ergebnisse der Mustererkennung ähneln jenen der Vollholzproben. Eine dritte Signalklasse, die eindeutig dem Klebstoffversagen zuzuordnen wäre, wurde nicht identifiziert. Jedoch lässt der Vergleich zwischen den Bruchbildern und den leichten Abweichungen in den Hauptparametern der Schallsignalklassen vermuten, dass die vom Klebstoffversagen generierten AE Signale insbesondere in der niederfrequenten Signalklasse abgebildet werden. Ähnliches ist für die Untersuchungen an den Sperrholzproben anzunehmen, denn auch hier wurde eine Signalklasse mit eher höheren und eine mit eher niedrigeren Frequenzanteilen identifiziert. Die Ursprünge dieser Signalklassen sind vermutlich auch hier Zellwandbrüche und Separations- bzw. Schermechanismen. Beide Versagenstypen treten während des gesamten Belastungsverlaufs, bis hin zum endgültigen Versagen des Materials auf. Für beide Defektzuwachsraten wurde, für beide AE Signalklassen, eine breite Variation der Defekt-Größen (anhand der Amplituden und Energien der auftretenden Schallemissionssignale) und damit auch eine mehrskalige Schadensentwicklung festgestellt.

Die durchgeführten Untersuchungen ergeben ein besseres Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen Größe und Funktion der verschiedenen Strukturelemente während der Schadensentwicklung in Sperrholz. Die Überwachung von Schadensentwicklung in Holzwerkstoffen mittels Kombination von AE und SR $\mu$ CT sowie die Vorstellung des neuen Ansatzes zur Mustererkennung von AE Signalen liefern fortschrittliche Methoden zur experimentellen Charakterisierung, Analyse und Auswertung im Feld der Holzforschung und unterstützen die Weiterentwicklung von Test- und Überwachungsmethoden.