

# Schallemissionsanalyse von Zugversuchen an industriell gefertigten Sperrhölzern

Franziska RITSCHEL\*, Yang ZHOU\*\*, Peter NIEMZ\*

\* Holzphysik, Institut für Baustoffe, ETH-Zürich, Schafmattstrasse 6, CH-8093 Zürich  
(fritschel@ethz.ch, niemzp@ethz.ch)

\*\* Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

**Kurzfassung.** In der Materialforschung ist die Schallemissions-Messung eine geeignete Methode für die Versagensanalyse, da sie als volumetrisches Verfahren Informationen über Vorgänge im Inneren des Materials liefert. Bei der Belastung eines Werkstoffes tritt Schädigung wie zum Beispiel Rissbildung oder Risswachstum auf. Diese Mechanismen setzen elastische Energie in Form transienter elastischer Wellen im Material frei, der sogenannten Schallemission. Für die Versagensanalyse verschiedener Industrie-Sperrhölzer (Fichtenholz) wurden quasistatische Zugversuche mittels Schallemissionsmessung überwacht. Der unterschiedliche Lagenaufbau der untersuchten Sperrhölzer, insbesondere der Anteil an (Quer-)Lagen mit der Faserrichtung senkrecht zum Faserverlauf der Deckfurniere, beeinflusst das Versagensverhalten. Obwohl Festigkeiten und E-Moduln variieren, kann aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen lediglich die Aussage über ein sprödes Materialverhalten aller Sperrholzvarianten getroffen werden. Demgegenüber liefert die Analyse der detektierten Schallemissions-Signale detailliertere Informationen über die Ausbildung von mikroskopischen und mesoskopischen Defekten sowie deren Zunahme und Interaktion bis hin zum Endversagen der untersuchten Sperrholzprüfkörper. Die unterschiedlichen Schädigungsverläufe können anhand der Unterschiede in Schallemissions-Aktivität (Signal-Anzahl) sowie Signal-Intensität (Signal-Energie) nachgewiesen werden.

## Einführung

Die zerstörungsfreie Methode der Schallemissions-Messung wird in der Praxis zur Überwachung von Bauteilen, die einer Dauerbelastung ausgesetzt sind, verwendet. Treten Schädigungen, zum Beispiel Risse in einem belasteten Werkstoff auf, so wird elastische Energie in Form transienter elastischer Wellen im Material freigesetzt. Diese Wellen, definiert als Schallemission, sind mittels Piezo-Sensoren an der Materialoberfläche detektierbar. In den Materialwissenschaften nutzt man die Prüfmethode dementsprechend, um das Schädigungsverhalten und Versagensmechanismen von Materialien zu analysieren [1]. Informationen über, insbesondere mikroskopische Versagensvorgänge im Inneren des Materials, werden mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung ( $\mu\text{s}$ ) erfasst.

Am Beispiel von Sperrholz, geprüft im quasistatischen Zugversuch und überwacht mit der Schallemissions-Methode, wird der Einfluss von Qualität und unterschiedlichen Lagenstrukturen auf das Schädigungsverhalten des Materials anhand der Resultate aus der Schallemissions-Messung diskutiert.



## Material und Methode

Untersucht werden verschiedene Sperrhölzer aus Fichtenholz. Es werden 4 Typen industriell gefertigter Bau-Sperrhölzer, bestehend aus 3, 4, 5 und 6 Furnier-Lagen (Abb. 1) untersucht. Das 3- und das 4-lagige Sperrholz sind grundsätzlich ähnlich aufgebaut. Sie bestehen aus den zwei Deckfurnieren mit Faserverlauf parallel zur Belastungsrichtung und einem Kern, dessen Furnier(e) mit dem Faserverlauf senkrecht zur Belastungsrichtung orientiert sind. Bei dem 3-lagigen Sperrholz besteht der Kern aus einem 3 mm dicken Furnier, der Kern im 4-Lagigen hingegen besteht 2 Furnieren von je 3 mm Dicke. Das 5- und das 6-lagige Sperrholz sind ebenso im Kern vergleichbar, wobei hier die Faserorientierung parallel zur Belastung ist (Abb. 1).

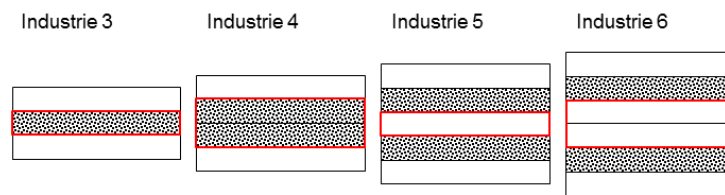


Abbildung 1. Lagenstruktur der Industrie Sperrhölzer mit gekennzeichneten Kern-Furnieren

Die industrielle Fertigung manipuliert die ursprüngliche Holzstruktur stark und hinterlässt u.a. Schäl- und Trocknungsrisse im Furnier. Furniere geringer Qualität (Astlöcher, Risse) werden grundsätzlich in den Mittellagen verarbeitet, während für die Decklagen hohe Qualitäten verwendet werden. Für einen Vergleich zum Einfluss dieser Vorschäden im Material, wird im Labor ein „Labor-Sperrholz“, bestehend aus 3 Lagen (vergleichbar mit Industrie 3) hergestellt. Dieses Labor-Sperrholz besteht aus nahezu fehlerfreien Holzlamellen, die schonend auf eine Dicke von 3 mm gehobelt wurden. Schälrisse sind in diesem Probenotyp nicht vorhanden. Bei allen Varianten beträgt die Furnierdicke 3 mm, die Lagenstrukturen sind in Tabelle 1 ausgewiesen. Die Prüfkörper-Geometrie entspricht der DIN 52377 [2]. Es wurden insgesamt je 5 Proben untersucht.

Tabelle 1. Lagenaufbau der untersuchten Sperrhölzer

Materialtyp	Faserorientierung	Dicke	Dichte
Lagenanzahl	(°)	(mm)	(kg/m <sup>3</sup> )
Labor 3	0 90 0	9	500
Industrie 3	0 90 0	9	500
Industrie 4	0 90 90 0	12	460
Industrie 5	0 90 0 90 0	15	420
Industrie 6	0 90 0 0 90 0	18	435

Die Zugversuche an einer Universalprüfmaschine wurden Traversen-gesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2.5 mm/min gefahren. Für die Schallemissions-(SE) Messung wurden zwei Piezo-Sensoren, Typ SE-150-M (Frequenzbereich: 100 kHz bis 450 kHz, Pik Frequenz: 150 kHz), verwendet. Die Sensoren wurden mit Silikon-freiem Schliiffett an die Probenoberfläche gekoppelt. Die Online-Datenerfassung erfolgte mit einer digitalen SE-Anlage (Typ AMSY 6, Vallen Systeme GmbH). Die Aufzeichnungsrate für Parameter und Wellenform der Schallsignale betrug 10 MHz (409.6 µs Signaldauer inklusive 200 Samples Pretrigger). Der Schwellwert wurde auf 45 dB<sub>AE</sub> gesetzt, die Rearm Time betrug 1 ms.

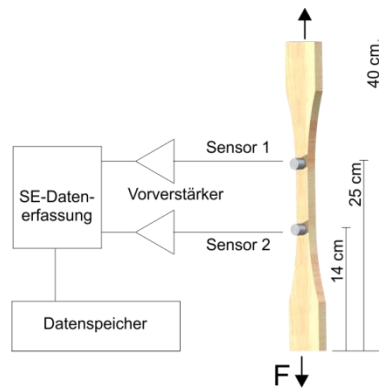


Abbildung 2. Prinzip der Versuchsanordnung

## Ergebnisse und Diskussion

Von den insgesamt 5 untersuchten Prüfkörpern je Materialtyp werden im Folgenden die Ergebnisse ausgewählter Exemplare (je Materialtyp eine Probe) vorgestellt. Die Auswertungen werden in Funktion der Versuchsdauer durchgeführt.

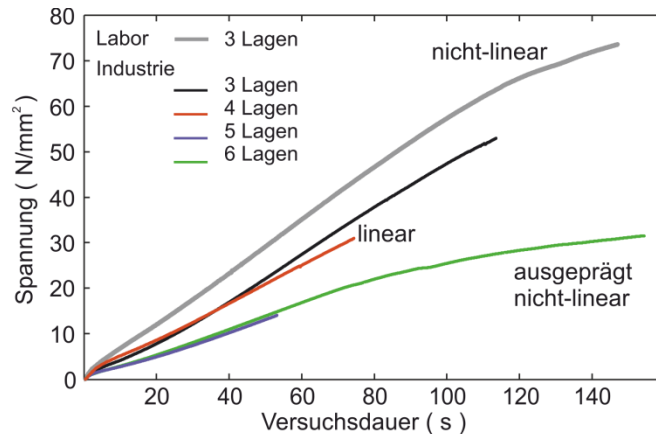


Abbildung 3. Festigkeit in Abhängigkeit der Versuchsdauer für die verschiedenen Sperrholz Prüfkörper

Im Vergleich aller Varianten zeigt das Labor-Sperrholz, entsprechend der höheren Qualität des verarbeiteten Materials, mit über  $70 \text{ N/mm}^2$  die höchste Zugfestigkeit. Der Prüfkörper aus Industrie-Sperrholz 3, mit dem gleichen Lagenaufbau, hat eine geringere Festigkeit von  $53 \text{ N/mm}^2$ . Der E-Modul beider Prüfkörper liegt mit  $12 \text{ GPa}$  deutlich über den übrigen Sperrholz-Varianten. Insgesamt zeigt das 5-lagige Sperrholz den niedrigsten E-Modul von  $5.5 \text{ GPa}$ . Die Industrie-Sperrhölzer 3, 4 und 5 zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Festigkeit und Versuchsdauer (Abb. 3). Hingegen wurde beim Labor-Sperrholz sowie beim 6-lagigen Industrie-Sperrholz mit fortschreitender Versuchsdauer eine geringere Zunahme der Spannung beobachtet.

Die Bruchbilder der einzelnen Prüfkörper (Abb. 4) zeigen komplexe Versagensmechanismen über den Prüfquerschnitt [3]. In allen Varianten sind vor allem in den Querlagen Risse und Brüche erkennbar, die auf Rollschub [4] hinweisen. Besonders ausgeprägt sind die Risse bei Industrie-Sperrholz 6, die Querlagen wurden stark auseinander gezogen. Delamination in den Längslagen entlang der Jahrringgrenze sind zu erkennen, wie auch entlang den Klebfugen [5].



Abbildung 4. Bruchbilder der Sperrholz-Typen: a) Labor 3 (ohne Schälrisse), b) Industrie 3, c) Industrie 4, d) Industrie 5, e) Industrie 6

Die Anzahl an Signalen gemessener Schallemission unter zunehmender Belastung des Prüfkörpers korreliert mit der Ansammlung an Schädigungen in der Materialstruktur. Mit zunehmender Lagenanzahl setzt die Ansammlung von SE-Signalen früher ein. Mit einsetzender Belastung wird bei allen Prüfkörpern zunächst ein exponentieller Verlauf der kumulierten SE-Anzahl vs. Versuchsdauer beobachtet (Abb. 5) [6].

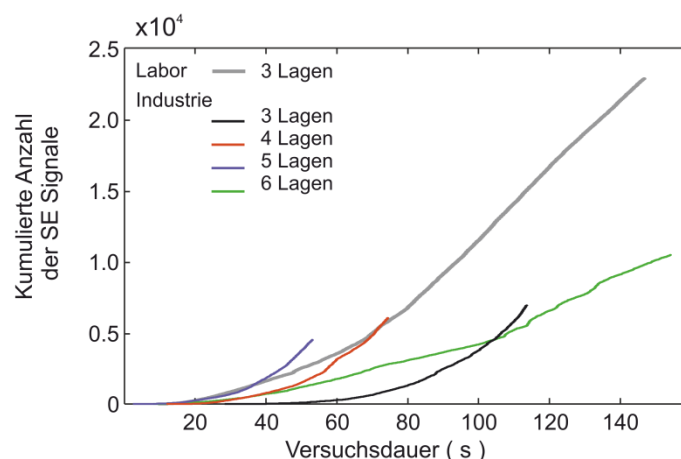


Abbildung 5. Kumulierte Anzahl der Schallemissions-Signale, detektiert mit beiden Sensoren (SE 150 M), in Funktion der Versuchsdauer für die verschiedenen Sperrholz Prüfkörper.

Dies entspricht einer beschleunigten Zunahme an Defekten und Schädigungsmechanismen. Bei den Sperrhölzern Industrie 3,4 und 5 zeigt sich der Einfluss der Lagenanzahl. Die zwei Ausnahmen bilden das Labor-Sperrholz sowie das Industrie-Sperrholz 6. Bei dem Labor-Sperrholz folgt die Ansammlung von Schadensereignissen zunächst einem exponentiellen Verlauf, der ab ca. 60 % der Bruchlast, bis hin zum endgültigen Versagen des Prüfkörpers, in einen linearen Kurvenverlauf übergeht. Dieser Übergang im Verhalten der kumulierten Anzahl SE Signale korreliert mit dem Übergang von der linearen in die nicht-lineare Phase im Spannungsverlauf in Funktion der Versuchsdauer (Abb. 3). Für das Industrie-Sperrholz 6 wird sehr früh eine annähernd linear ausgeprägte Ansammlung von SE Signalen beobachtet.

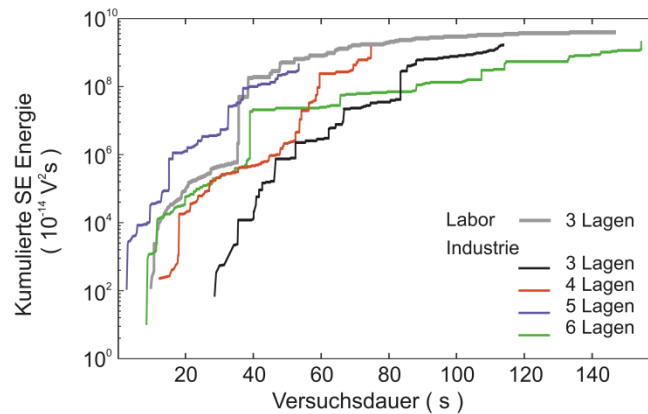


Abbildung 6. Kumulierte Schallemissions-Energien der verschiedenen Sperrholz-Prüfkörper in Funktion der Versuchsdauer.

Die Energie der SE Signale pro Zeiteinheit, definiert als das quadrierte Spannungssignal integriert nach der Zeit, korreliert meist mit dem Ausmaß auftretender Schädigungsereignisse. Einen ersten Überblick zur Freisetzung der elastischen Energie geben die, mit fortschreitender Versuchsdauer aufsummierten Energien aller detektierten SE Signale (Abb. 6). Die logarithmische Skala offenbart insbesondere Zeitpunkte erhöhter Energiefreisetzung in den niedrigeren Energiebereichen. Diese stehen in Zusammenhang mit Schädigungen in den schwachen Querlagen bereits bei niedrigen Lasten auftreten [7, 8]. Im Prüfkörper Labor-Sperrholz erfolgt beispielsweise bei 35 s ein erster deutlicher Sprung in der SE-Energie von ca.  $10^5 \times 10^{-14} \text{ V}^2\text{s}$  auf  $10^7 \times 10^{-14} \text{ V}^2\text{s}$ .

Tabelle 2. Freigesetzte Schallemissions-Energie bis zu einer Last von 50% der Bruchlast und insgesamt freigesetzte Schallemissions-Energie

Prüfkörper	Kumulierte Schallemissions-Energie ( $10^{-14}\text{V}^2\text{s}$ ) bei		% -Anteil Schallemissions- Energie bis 50% der Bruchlast
	Bruchlast	50% der Bruchlast	
Labor 3	$3.9 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^9$	30.0 %
Industrie 3	$1.8 \cdot 10^9$	$2.5 \cdot 10^6$	0.1 %
Industrie 4	$1.5 \cdot 10^9$	$4.1 \cdot 10^5$	0.3 %
Industrie 5	$4.8 \cdot 10^8$	$3.5 \cdot 10^6$	0.7 %
Industrie 6	$2.1 \cdot 10^9$	$2.3 \cdot 10^7$	1.1 %

Insgesamt wurde bei den Industrie-Sperrhölzern, Ausnahme ist das 5-Lagige, SE-Energie annähernd gleicher Größenordnung ( $10^9 \times 10^{-14} \text{ V}^2\text{s}$ ) wie für das schonend hergestellte Labor-Sperrholz gemessen (Tabelle 2). Jedoch wurde bei den Industrie-Sperrhölzern nur halb so viel Energie freigesetzt wie bei dem Labor-Sperrholz. Dies ist zurückzuführen auf die vorhandenen Vorschädigungen im Industrie-Sperrholz, welche bereits zu einem Teilverlust der im Material gespeicherten elastischen Energie geführt haben. Vergleicht man für die verschiedenen Materialien die Summe freigesetzter SE-Energie bei einer Belastung entsprechend 50 % der Bruchspannung, so wird der Einfluss der Vorschädigungen deutlich. Das Labor-Sperrholz hat dann bereits 30 %, die Industrie-Sperrhölzer haben hingegen nur etwa 1 % der insgesamt gemessenen Schallemissions-Energie (je Zugversuch) freigesetzt.

## Zusammenfassung

Mit der Methode der Schallemissions-Messung ist es möglich, zusätzlich zur makroskopischen Betrachtung des Materialversagens, dem Spannungs-Zeit-Verlauf aus dem Zugversuch, die Entwicklung des mikroskopischen Schadensverlauf zu analysieren. Die Bruchbilder der Prüfkörper zeigen ähnliche Versagensphänomene in den verschiedenen Materialien, dennoch unterscheidet sich das Versagensverhalten bis hin zum Bruch. Der Einfluss von Lagenaufbau und Qualität (Vorschädigung) der Furnierlagen wird in der Ansammlung der SE Signale und der SE-Energie deutlich.

Eine konstante Spannungsrate (Spannung über Zeit) geht einher mit einer beschleunigten (exponentiellen) Ansammlung submakroskopischer Schadensereignisse im Material. Mit zunehmender Lagenanzahl (Industrie-Sperrholz 3, 4 und 5) setzt die Ansammlung von SE-Signalen früher ein. Das Industrie-Sperrholz 6, mit einem Kern aus zwei Längslagen, zeigt ein deutlich anderes Versagen im Spannungs-Zeit-Verlauf sowie in der Schallemissions-Analyse als das Industrie-Sperrholz 5. Im Gegensatz zum Industrie-Sperrholz 5, mit seiner exponentiellen SE Zunahme, ist beim Industrie-Sperrholz 6 ein annähernd linearer, gleichmäßiger SE Zuwachs zu beobachten. Zudem wird beim Industrie-Sperrholz 6 die höchste SE Energie unter den Industrie Sperrhölzern gemessen. Auf Grund der geringeren Vorschädigung des schonend hergestellten, fehlerarmen Labor-Sperrholzes, tritt bei Belastung eine höhere Anzahl an Schädigung im Material auf, dies zeigt die deutlich höhere Gesamtanzahl an SE Signalen.

Vergleicht man die Gesamtmenge an kumulierter SE Energie von den Sperrhölzern Labor 3 und Industrie 3, wird deutlich, dass Industrie 3 unter Belastung nur ca. halb so viel elastische Energie freisetzen kann wie Labor-Sperrholz 3. Bis zu einer Belastung von 50 % der Bruchlast setzt das Labor-Sperrholz 3 30 % seiner gesamten SE-Energie frei, während an den Industrie-Sperrhölzer nur ca. 1 % der gesamten SE-Energie gemessen wurde.

## Danksagung

Das Projekt wird finanziert vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) Projekt 127'134.

## Referenzen

- [1] P. O. Moore. Editor. 2005. Nondestructive testing handbook: acoustic emission testing. USA: American Society for Non-Destructive Testing (Vol. 6).
- [2] DIN 52377. 1978. Prüfung von Sperrholz. Bestimmung des Zug-Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit. Deutsches Institut für Normung e.V.
- [3] I. V. Ivanov, T. Sadowski, M. Filipiak. Marcin Kneć. 2008. Experimental and numerical investigation of plywood progressive failure in CT tests. *Budownictwo i Architektura* 2: 79-94.
- [4] R. Görlacher. 2002. Ein Verfahren zur Ermittlung des Rollschubmoduls von Holz. *Holz Roh Werkst* 60: 317–322.
- [5] V. Bucur. Editor. 2011. *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. Springer.
- [6] S. Aicher, L. Höfflin, G. Dill-Langer. 2001. Damage evolution and acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber. *Holz Roh Werkst* 59: 104–116.
- [7] M. P. Ansell. 1982. Acoustic Emission from Softwoods in Tension. *Wood Sci. Technol.* 16: 35-58.
- [8] F. Ritschel, A. J. Brunner, P. Niemz. 2013. Nondestructive evaluation of damage accumulation in tensile test specimens made from solid wood and layered wood materials. *Comp Struct* 95: 44–52.