

Schallemissionsanalyse ausgewählter Zugversuche an unterschiedlichen Klebeverbindungen für Holz

Andreas J. BRUNNER*, Thomas TANNERT**

* Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Mechanical Systems Engineering, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf, Schweiz, e-mail: andreas.brunner@empa.ch

** University of British Columbia, Department of Wood Science, Vancouver, V6T 1Z4, Canada, e-mail: thomas.tannert@ubc.ca

Kurzfassung. Für Design und Herstellung von tragenden Elementen oder Tragwerken aus Holz werden zunehmend geklebte Verbindungen gewählt. Für die praktische Anwendung solcher Verbindungen müssen die Festigkeit und das Schädigungsverhalten unter mechanischen oder thermo-hygro-mechanischen Belastungen untersucht werden. Schallemissionsanalyse ist eine hervorragende Methode für die zerstörungsfreie Überwachung mechanischer Belastungsversuche. An ausgewählten Beispielen unterschiedlicher verklebter Holzprüfkörper wird das mit Schallemissionsanalyse ermittelte Schädigungsverhalten unter quasistatischer oder stufenweiser Zugbelastung dargestellt und diskutiert. Für die Versuche auf einer servo-hydraulischen Universalprüfmaschine wurden zwischen acht und fünfzehn Schallemissionssensoren unterschiedlicher Typen verwendet. Diese Typen waren: zweiseitig überlappende Klebeverbindungen, in Holzbalken eingeklebte Glasfaser-Kunststoff-(GFK)-Stäbe sowie eingeklebte Stahlplatten. Bei den zweiseitig überlappenden Klebeverbindungen zwischen Fichtenholz verläuft die Schädigung im Holzwerkstoff und nicht in der Verklebung. Die in Fichtenholz verklebten GFK-Stäbe und Stahlplatten wurden aus dem Holzwerkstoff gezogen, wobei aber vor dem Versagen deutliche Schädigungen (z.B. makroskopisch sichtbare Risse) im Holzwerkstoff entstanden. Die Experimente und die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse können anschließend mit Modellen verglichen werden, was bei genügender Übereinstimmung eine Vorhersage der Tragfähigkeit erlaubt.

Einführung

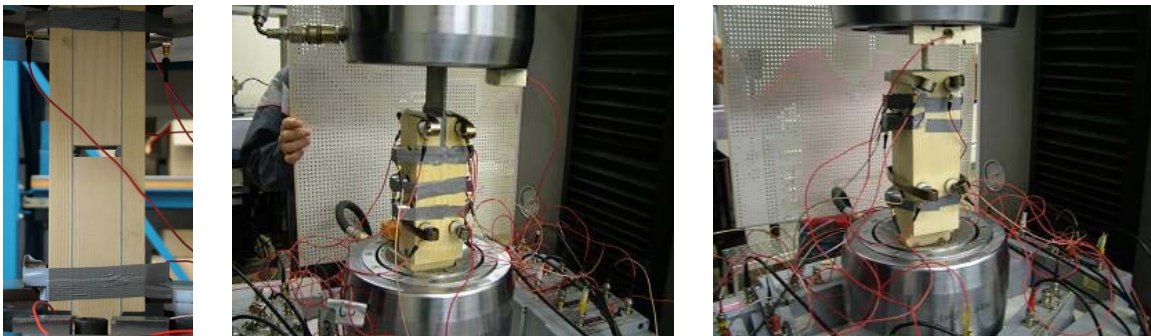
Geklebte Verbindungen finden seit einigen Jahren vermehrt Verwendung bei der Herstellung von Holztragwerken oder tragenden Elementen aus Holz. Für die Entwicklung von Design-Richtlinien, die Abschätzung des Verhaltens unter Lasten (mechanisch oder thermo-hygro-mechanisch) und somit für die sichere Nutzung dieser Tragwerke ist das Verständnis des Schädigungsverhaltens bzw. der Schädigungszunahme unter Last wichtig. Zu diesem Zweck wurden drei Typen geklebter Holzverbindungen quasi-statischer und stufenweiser Zugbelastung bis zum Versagen unterworfen und die Schädigungszunahme mit Schallemissionsmessung erfasst. Als Prüfkörper wurden zweiseitig überlappende Klebeverbindungen sowie eingeklebte Stahlplatten bzw. Glasfaser-Kunststoff (GFK) Stäbe verwendet. Das Schädigungsverhalten dieser Holzverbindungen unter Zugbelastung wurde mit Hilfe der Schallemissionsanalyse verglichen.



Experimentelles

1.1 Prüfkörper und Belastung

Figur 1 zeigt Bilder der unterschiedlichen Prüfkörper während den Belastungsversuchen. Für alle Prüfkörper wurde Fichte (*Picea abies*) verwendet, wobei für die Herstellung möglichst fehlerfreie Holzbalken ausgewählt wurden. Die Verklebungen wurden mit einem kommerziellen Zweikomponentenkleber (SikaDur 330) hergestellt. Die zweiseitig überlappenden Klebverbindungen wurden aus Lamellen mit einer Dicke von 19 mm (äussere Lamelle) bzw. 38 mm (innere Lamelle) und einer Klebschichtdicke von 1.0 mm gefertigt. Die Klebschicht hatte eine Länge (Überlappung) von 120 mm. Die Holzbalken für die Verklebung mit GFK-Stäben und Stahlplatten hatten eine Länge von 400 mm, und Querschnittsmasse von 75 mm x 75 mm. Die GFK-Stäbe hatten einen Durchmesser von 8 mm, die Kleblänge beträgt 120 mm. Die Stahlplatten hatten eine Breite von 75 mm und eine Dicke von 5 mm. Ähnliche Prüfkörper sind bereits früher mit Schallemission untersucht worden (z.B. [1-3]). Die Schallemissionsanalyse der zweiseitig überlappenden Holz-Holz-Verklebungen ist in [4] zusammengefasst, der Fokus dieses Beitrags liegt daher auf dem Vergleich der unterschiedlichen Verklebungspartner (Holz, Stahl, GFK).



Figur 1: Fotos der drei Prüfkörpertypen mit den Schallemissionsaufnehmern während der Zugbelastung (links) zweiseitig überlappende Holz-Holz-Verklebung, (Mitte) Stahlplatte verklebt in Holzbalken (rechts) GFK-Stab verklebt in Holzbalken.

Die Zugbelastung erfolgte auf servo-hydraulischen Prüfmaschinen (Typ Instron 1346 für die zweiseitig überlappenden Klebverbindungen und auf Typ Instron 1251 für die übrigen Prüfkörper) mit einer Traversengeschwindigkeit von 0.5 mm/min bzw. 1.0 mm/min. Nach einem Vorversuch (Figur 2 oben) wurden vier der sechs zweiseitig überlappenden Holz-Klebverbindungen stufenweise mit 15 und 20 kN (Haltezeit je vier Minuten) mit nachfolgender Entlastung und Wiederbelastung bis zum Versagen, die übrigen zwei nur mit einer Laststufe von 20 kN und nachfolgender Entlastung sowie Belastung bis zum Versagen geprüft. Die je drei Prüfkörper mit Holz-Stahlplatte-Verklebung und Holz-GFK-Stab Verklebung wurden zwei Mal quasistatisch und einmal stufenweise (sechs bzw. vier Laststufen) bis zum Versagen geprüft.

1.2 Schallemissionsmessung

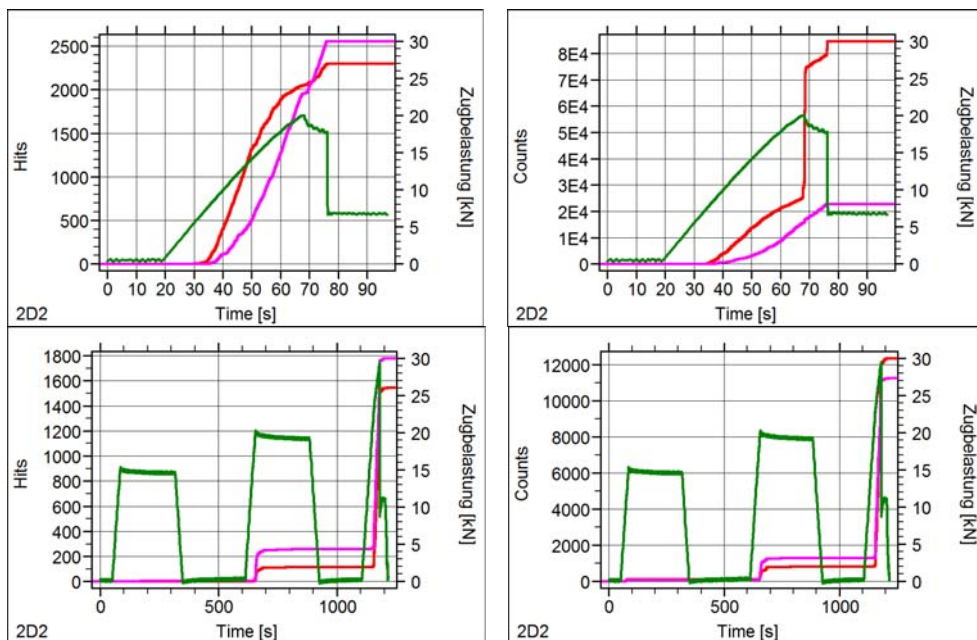
Die Schallemissionsmessungen erfolgten mit einem kommerziellen Gerät (Typ AMSY-5 von Vallen Systeme GmbH) mit 150 kHz-Resonanzsensoren (Typ SE-150M von Dunegan Engineering Corp.) sowie mit multifunktionellen Sensoren (Typ VS-45H von Vallen Systeme GmbH). Je nach Prüfkörper wurden acht bis zehn Aufnehmer verwendet. Die Auswertung erfolgte mit dem Geräte-spezifischen Programm-Paket (VisualAE®). Die Kopplung der Sensoren wurde vor dem Versuch mittels Autokalibrationsfunktion des

Geräts und in einzelnen Fällen mit zusätzlichen Bleistiftminenbrüchen überprüft. Die Signalschwelle wurde für die zweiseitig überlappende Holz-Holz-Verklebung auf 40 dB_{AE}, für die Holz-GFK-Stab-Verklebung auf 31 bzw. 45 dB_{AE} und für die Holz-Stahl-Verklebung auf 35 bzw. 45 dB_{AE} (je nach Sensortyp) gelegt, die „re-arm time“ betrug 3.28 ms und die Last- und Verschiebungssignale der Prüfmaschine wurden mit einer Rate von ca. 4 Hz als analoge 10-V-Signale synchron im Datensatz erfasst.

2. Ergebnisse und Diskussion

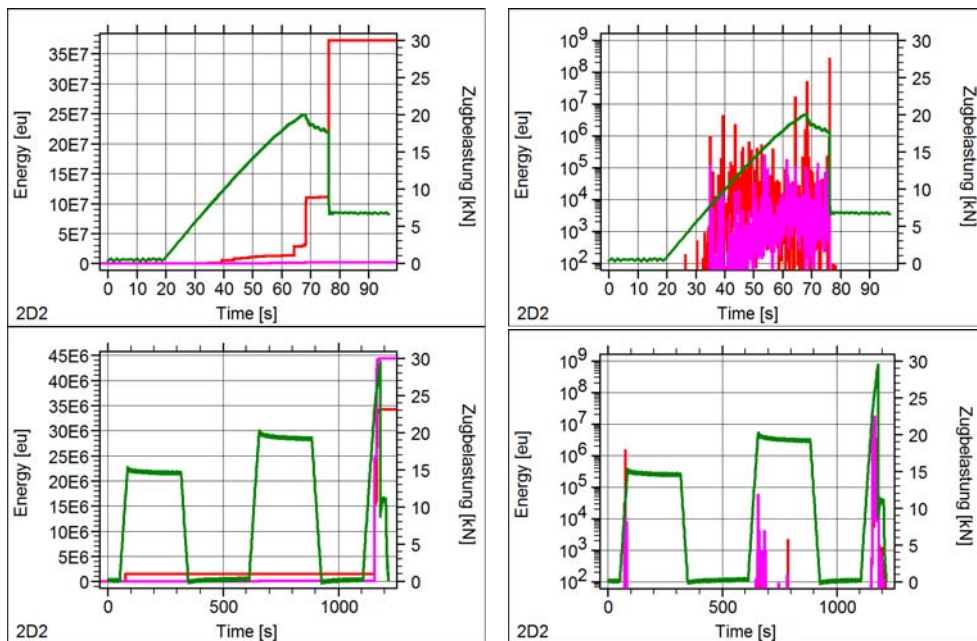
2.1 Verklebung Holz-Holz

Für die Auswertung der Schallemissionssignale werden zuerst die Schallemissionsaktivität und dann die Schallemissionsintensität in Funktion der Last untersucht. Figur 2 zeigt ausgewählte Beispiele für die Schallemissionsaktivität bzw. Figur 3 für die Schallemissionsintensität quasistatisch bzw. stufenweise belasteter Prüfkörper.



Figur 2: Quasistatischer (oben) und stufenweiser Zugversuch (unten) an zweiseitig überlappenden Holz-Holz-Verklebungen: Schallemissionsaktivität als kumulative Anzahl erfasster Signale („hits“) bzw. Überschwingungen („counts“) in Funktion der Zeit für zwei Aufnehmer (Typ SE-150M).

Die kumulativen Kurven der Anzahl Schallemissionssignale bzw. der Anzahl Überschwingungen (Figur 2) verlaufen, wie erwartet, vergleichbar. Bei der zweiten Laststufe bis 20 kN wird, je nach Prüfkörper bzw. Versagenslast (im Bereich zwischen etwa 20 und 32 kN, siehe [4]), ein Felicity-Verhältnis von etwa eins oder mehr beobachtet, was im ersten Fall auf einen Zustand nahe einer möglicherweise kritischen Belastung hinweist. Bei der zweiten Laststufe dauert es tendenziell länger, bis die Schallemissionsaktivität bei konstanter Verformung abklingt. Die Last bleibt dabei nicht konstant, sondern nimmt beim weg-gesteuerten Versuch, wegen Relaxation mit zunehmender Haltezeit, geringfügig ab.

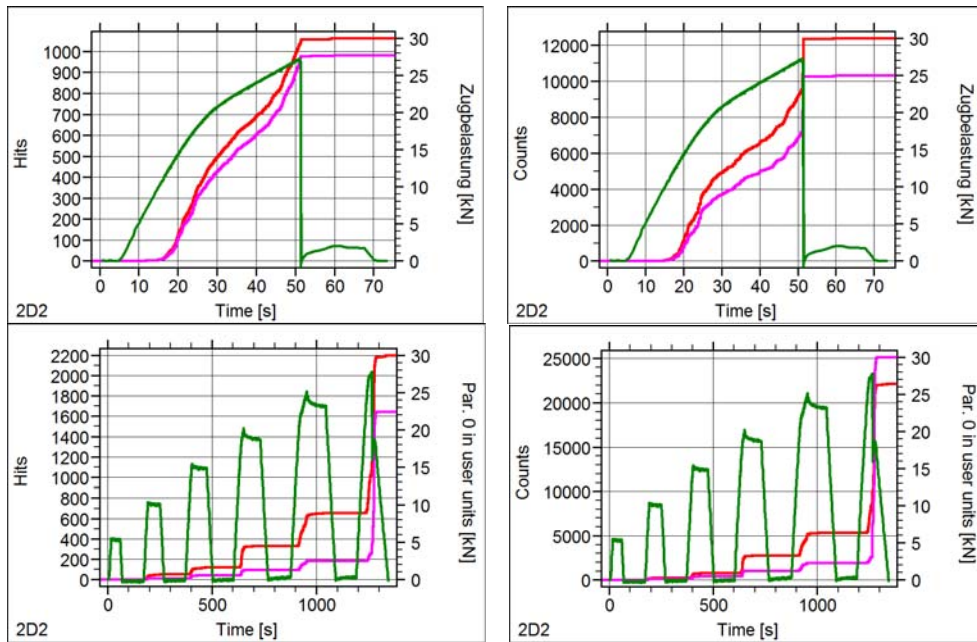


Figur 3: Quasistatischer (oben) und stufenweiser Zugversuch (unten) an zweiseitig überlappenden Holz-Holz-Verklebungen: Schallemissionsintensität (Signalenergie) als kumulative Kurve bzw. als Rate (pro 0.1 Sekunde) in Funktion der Zeit für zwei Aufnehmer (Typ SE-150M).

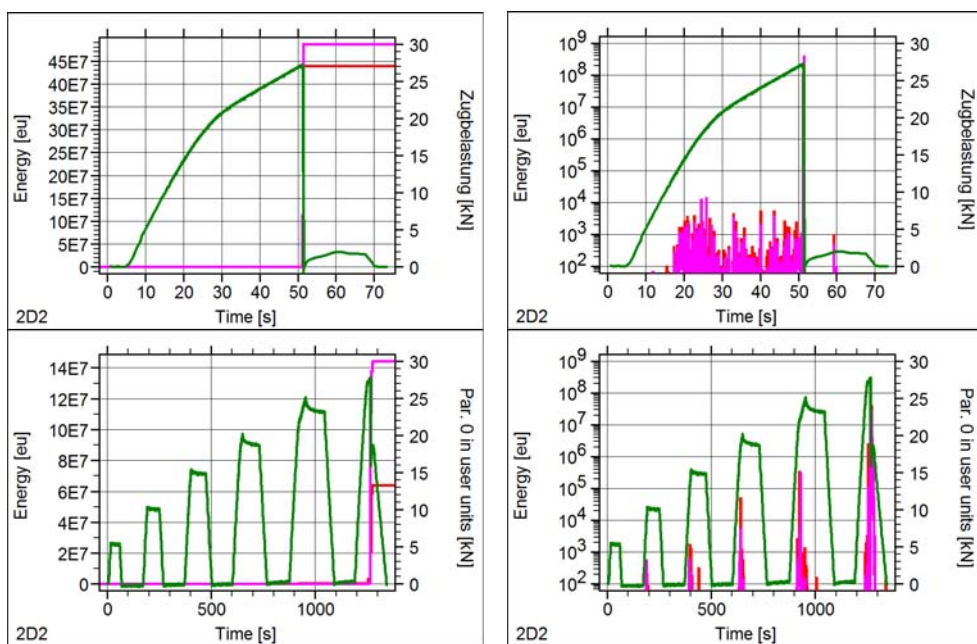
Figur 3 zeigt, dass der wesentliche Anteil der kumulativen Energie der Schallemissionssignale bei der dritten Laststufe vor und während dem Versagen freigesetzt wird. Die Darstellung der Energierate zeigt aber bereits bei der ersten Laststufe signifikante Intensität, die allerdings bei konstanter Last analog zur Schallemissionsaktivität sehr schnell abklingt. Bei der zweiten Laststufe ist die Energie-Rate etwas niedriger, aber die Aktivität dauert länger an als bei der ersten Laststufe. Beim Anstieg zur dritten Laststufe fällt das Felicity-Verhältnis als Indikator für das Ausmass der Schädigung des Prüfkörpers auf etwa eins (Figur 3) oder einen Wert darunter [4], was auf signifikante Schädigung hinweist.

2.2 Verklebung Holz-Stahlplatte

Figuren 4 und 5 zeigen die Schallemissionsaktivität und Schallemissionsintensität für je einen quasistatischen und einen stufenweisen Zugversuch an einer Holz-Stahlplatten-Verklebung bis zum Versagen. Dies kann mit dem Verhalten der Holz-Holz-Verklebung (Figuren 2 und 3) verglichen werden. Die Lastkurve in Funktion der Zeit zeigt mindestens beim quasi-statischen Zugversuch ein deutlich signifikanteres, nichtlineares Verhalten im Vergleich zur Holz-Holz-Verklebung. Der Verlauf der Schallemissionsaktivität ist aber ähnlich und zeigt einen deutlichen Anstieg ab etwa 50% der Versagenslast. Die kumulative Energie der Schallemissionssignale zeigt, dass der grösste und somit wesentliche Anteil erst beim Versagen emittiert wird. Die Darstellung der Energie-Rate dagegen belegt, dass analog zum Verlauf der Schallemissionsaktivität bei Belastungen um 50% der Versagenslast im quasistatischen Versuch bzw. bei jeder Laststufe ab diesem Lastwert doch signifikante Schallemissionsenergie aufgezeichnet wird. Das Felicity-Verhältnis sinkt bei der letzten Laststufe auf einen Wert um eins, ebenfalls konsistent mit signifikanter Schädigung.



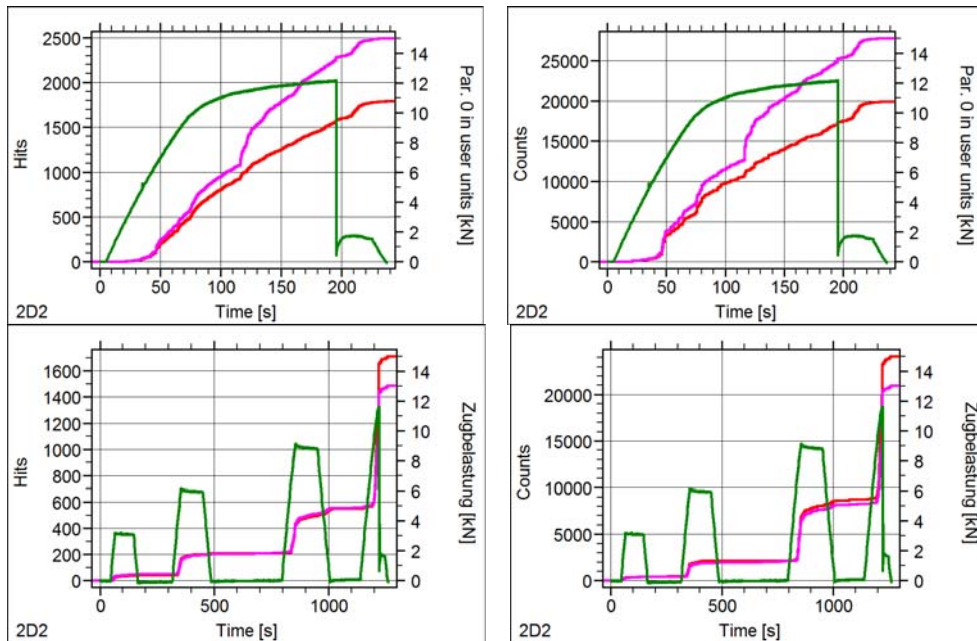
Figur 4: Quasistatischer und stufenweiser Zugversuch an Holz-Stahlplatten-Verklebung: Schallemissionsaktivität als kumulative Anzahl erfasster Signale („hits“) bzw. Überschwingungen („counts“) in Funktion der Zeit für zwei Aufnehmer (Typ SE-150M).



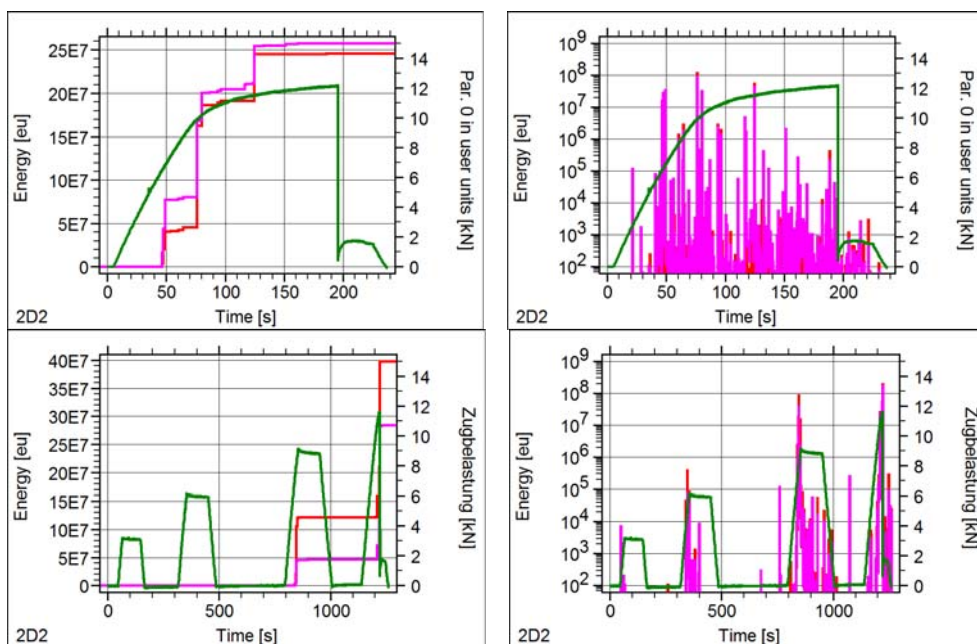
Figur 5: Quasistatischer und stufenweiser Zugversuch an Holz-Stahlplatten-Verklebung: Schallemissionsintensität (Signalenergie) als kumulative Kurve bzw. Rate (pro 0.1 Sekunde) in Funktion der Zeit für zwei Aufnehmer (Typ SE-150M).

2.3 Verklebung Holz-GFK-Stab

Figuren 6 und 7 zeigen die Schallemissionsaktivität und Schallemissionsintensität für je einen quasistatischen und einen stufenweisen Zugversuch an einer Holz-GFK-Stab-Verklebung bis zum Versagen. Dies kann mit dem Verhalten der Holz-Holz-Verklebung (Figuren 2 und 3) bzw. der Holz-Stahlplatten-Verklebung (Figuren 4 und 5) verglichen werden. Detailliert wird dies im Abschnitt 2.4 unten diskutiert.



Figur 6: Quasistatischer und stufenweiser Zugversuch an Holz-GFK-Stab-Verklebung: Schallemissionsaktivität als kumulative Anzahl erfasster Signale („hits“) bzw. Überschwingungen („counts“) in Funktion der Zeit für zwei Aufnehmer (Typ SE-150M).

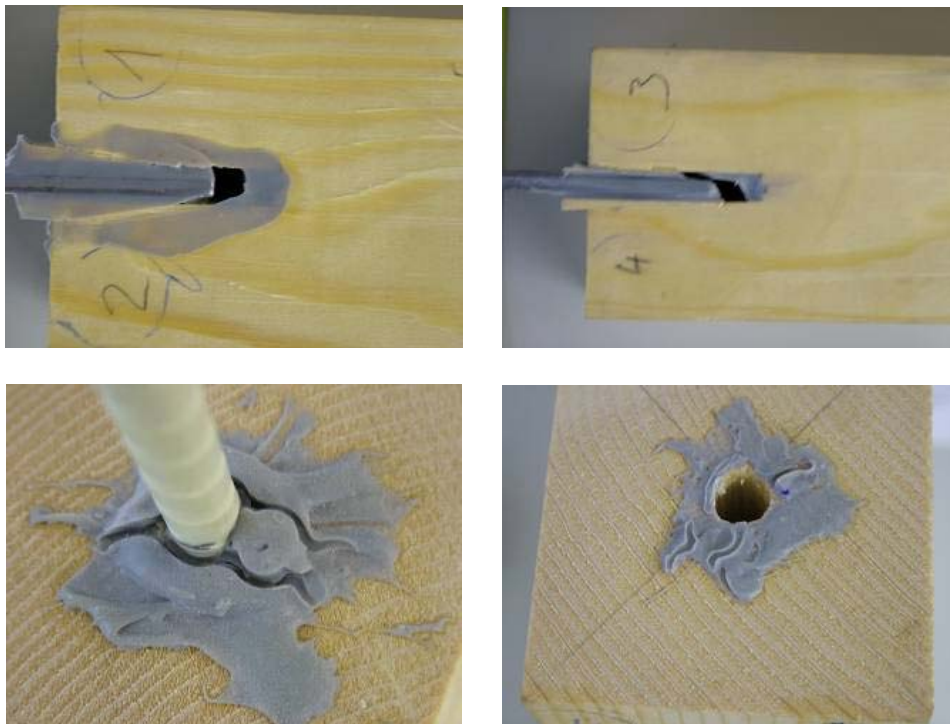


Figur 7: Quasistatischer, stufenweiser Zugversuch an Holz-GFK-Stab-Verklebung: Schallemissionsintensität (Signalenergie) als kumulative Kurve bzw. Rate (pro 0.1 Sekunde) in Funktion der Zeit für zwei Aufnehmer (Typ SE-150M).

Die Last in Funktion der Zeit verläuft deutlich nichtlinear, dies beginnt bei etwa 50% der Versagenslast. Die Schallemissionsaktivität setzt bei Belastungen unterhalb 50% der Versagenslast ein. Vor allem die Energie-Raten der einzelnen Versuche zeigen ab Beginn signifikanter Schallemissionsaktivität auch signifikante Schallemissionsintensität von mehr als 10^5 Energieeinheiten („e.u.“ = „energy units“ von $10^{-14} \text{ V}^2\text{s}$) pro Zeiteinheit (0.1 Sekunden in der hier gewählten Darstellung). Bei der dritten Belastungsstufe sinkt das Felicity-Verhältnis unter eins, wieder gleichbedeutend mit signifikanter Schädigung.

2.4 Vergleichende Diskussion

Die Versagenslast von etwa 12 kN bei den Holz-GFK-Stab-Verklebungen ist deutlich niedriger als der Mittelwert von ca. 27 – 28 kN der andern beiden Typen (Figuren 6 und 7 sind bis 15 kN statt 30 kN skaliert). Trotz Auswahl qualitativ hochwertiger Holzbalken mit geringer Vorschädigung oder wenigen potentiellen Schädigungsinitiatoren, z.B. Astlöcher oder andere Inhomogenitäten, ist die Streuung der Versagenslast (± 4.6 kN) bei den zweiseitig überlappenden Holz-Holz-Verklebungen relativ gross. Bei den anderen Prüfkörpertypen ist die Stichprobe mit je drei Stück pro Prüfkörper allerdings zu gering, um vergleichbare, statistisch zuverlässig Streuungswerte zu ermitteln. Kumulative Energie und Energie-Raten zeigen für die Holz-GFK-Stab-Verklebung bereits bei niedrigeren Belastungen einen signifikanten Anstieg als jene der anderen beiden Typen. Dies kann eventuell mindestens teilweise auf eine gewisse Schädigung des GFK-Stabs unter Zugbelastung hinweisen, diese Hypothese müsste aber mit vergleichenden Zugversuchen an GFK-Stäben überprüft werden. Ein weiterer Faktor kann eventuell die zylindrische Form der Verklebung sein, bei der einerseits durch die Bohrung das Holz im Bereich des Bohrlochs geschädigt wird und andererseits möglicherweise lokale Spannungskonzentrationen in der Verklebung entstehen. Auf jeden Fall verläuft die Schädigung unter Zugbelastung bei den Holz-GFK-Stab-Verklebungen schneller als bei den anderen Typen, was in einer deutlich niedrigeren Versagenslast resultiert.



Figur 8: Fotos der Holz-Stahl (oben) bzw. der Holz-GFK-Stab-Verklebung (unten) nach dem Versagen, bei der Holz-Stahl-Verklebung sind im Bereich um die Verklebung Rissbildung bzw. Ablösung von Holz erkennbar, beim Holz-GFK-Stab zeigt der überschüssige Kleber um das Bohrloch Hinweise auf Rissbildung.

Figur 8 zeigt Fotos der Holz-Stahlplatten- bzw. der Holz-GFK-Stab-Verklebung nach dem Versagen. Dabei sind im Bereich der Verklebung mit der Stahlplatte an der Oberfläche des Holzbalkens Risse erkennbar. Diese verlaufen etwa parallel zur Belastungsrichtung. In einem Fall (Figur 8 oben rechts) wurde eine an der Stahlplatte haftende Holzschicht mit der Platte zusammen aus dem Holzbalken gezogen. Im Fall der

GFK-Stab-Verklebung sind in den Fotos nur Risse im überschüssigen Klebstoff an der Oberfläche des Holzbalkens erkennbar. Es bleibt aber offen, wie weit im Innern des Holzbalkens, um das Bohrloch herum, mikroskopische, mesoskopische oder makroskopische Risse entstanden sind. Wie in [4] gezeigt, verläuft für die Holz-Holz-Verklebungen die Bruchfläche nicht in der Klebfläche selbst, sondern im Holz nahe der Klebfläche, vergleichbar zu ähnlichen überlappenden Klebverbindungen anderer Klebpartner [4, 5].

3. Schlussfolgerungen

Vergleichende Schallemissionsanalyse von Zugversuchen an drei Typen von Holz-Klebeverbindungen zeigen bereits in einfachen Auswertungen der Schallemissionsaktivität und Schallemissionsintensität deutliche Unterschiede im Schädigungsverlauf bzw. Versagensverhalten. Von den drei Prüfkörper-Verklebungen (Holz-Holz, Holz-Stahlplatte, Holz-GFK-Stab) ergibt die Holz-GFK-Stab-Verklebung die niedrigste Versagenslast unter uniaxialer Zugbelastung. Dies ist konsistent mit einem vergleichsweise frühen Beginn signifikanter Schallemissionsaktivität und Schallemissionsintensität.

Referenzen

- [1] C. Godzecki, J. Smardzewski (2005) „Detection of failures of adhesively bonded joints using the acoustic emission method“, *Holzforschung*, 59, pp. 219-229.
- [2] L. Pazdera, J. Smutny, D. Janostik, M. Korenska, P. Prouzova (2005) „Study of Metal Timber Join by Acoustic Emission Method“, *Proceedings The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing »Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering«* September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia, pp. 299-307.
- [3] O.V. Gurin, E.I. Luk'yanov (1992) “Evaluation of the quality of adhesive bonding of rods by the acoustic emission method”, (Übersetzung in Englisch) *Defektoskopiya*, 7, pp. 31-34.
- [4] A.J. Brunner, G.P. Terrasi, T. Vallée, T. Tannert (2009) „Monitoring and evaluation of damage behaviour of adhesively bonded joints under tensile loads“, *Proceedings 22. Internationales Symposium Swiss Bonding 2009*, pp. 267-278.
- [5] A.J. Brunner, G.P. Terrasi (2008) “Acousto-Ultrasonic Signal Analysis for Damage Detection in GFRP Adhesive Joints”, *Journal of Acoustic Emission*, 26, pp. 152-159.