



*Dr. Klaus Richter
EMPA Dübendorf
Abteilung Holz*

Feuchtebeständige Verklebung von Brettschichtholz durch den Einsatz eines Haftvermittlers

Feuchtebeständige Verklebung von Brettschichtholz durch den Einsatz eines Haftvermittlers

Adhäsion und Feuchtigkeit

Die Verbindung von Holzteilen durch Leime und Klebstoffe hat die Holzverwendung entscheidend geprägt. Während bis zur Mitte des zu Ende gehenden Jahrhunderts vor allem Leime verwendet wurden, die auf der Basis tierischer oder pflanzlicher Polymere hergestellt wurden (Glutin, Kasein, Stärke), dominieren heute fast ausschliesslich synthetisch hergestellte Bindemittel die Palette der eingesetzten Klebstoffsysteme. In der Holzindustrie sind die Polyvinylacetat-Klebstoffe (Weissleime) für die Anwendung in nichttragenden Bauteilen und die Polykondensationsharze für die lasttragenden Bauteile sowie für die gesamte Palette der Holzwerkstoffe nach wie vor die mit Abstand wichtigsten Klebstoffsysteme.

Das Ziel aller Klebstoffverbindungen ist, die Klebpartner mechanisch stabil und mit ausreichender Festigkeit dauerhaft zu verbinden. Grundsätzlich sollte bei Holzverklebungen die Querkzug- und Scherfestigkeit des Klebstoffes und der Holz-Klebstoff Berührungsfläche höher sein als die des Holzes. Erkennbar ist dies sehr anschaulich an Bruchflächen, die hohe Holzfaserteile aufweisen. Die Festigkeiten sollen aber nicht nur unter 'normalen' Feuchte- und Temperaturverhältnissen vorhanden sein, sondern auch bei temporär sich einstellenden 'extremen' Klima- und Belastungsbedingungen. Es sind vor allem Feuchteinflüsse, die sowohl die innere Festigkeit der Klebstoffe selbst (Weissleime), als auch – über die Schwind- und Quellungsbewegungen des Holzes – die Kontaktflächen von Klebstoff und Holz intensiv beanspruchen. Deutliches Indiz für eine unzureichende Feuchtebeständigkeit von Holzverklebungen sind sogenannte 'offene Leimfugen', die im Rahmen von Schadensuntersuchungen an zeitweise feuchteexponierten Holzbauteilen allzu oft beanstandet werden müssen.

Die negativen Einflüsse von dampfförmiger Feuchte oder flüssigem Wasser auf die Beständigkeit von Holz-Klebstoffverbindungen spiegeln sich in der Einteilung der Beanspruchungsbedingungen wieder, die in den Normen zur Prüfung und Klassifizierung von Holzklebstoffen vorgenommen wurde. Sowohl bei den nichttragenden als auch bei den tragenden Holzklebstoffen wird zwischen einer Verwendung der Bauteile in trockenen und feuchten Anwendungsbedingungen unterschieden (EN 204: Dauerhaftigkeitsklassen D1 bis D4; EN 301: Klebstoffklasse I und II, entsprechend Nutzungsklasse 1 bis 3 im Eurocode 5, ENV 1995-1-1:1993).

Die Verbesserung der Feuchtebeständigkeit von Holzklebstoffen war und ist ein andauerndes Ziel der Klebstoffchemiker, um den Anforderungen der o.g. Normen zu genügen. Durch die Einbindung von vernetzungsfördernden Härtern (Ammoniumchloride, Isocyanate) können PVAc-Klebstoffe in den Anforderungsgruppen D3 und D4 eingesetzt werden. Bei den Polykondensationsklebstoffen führt die Vernetzung der Harnstoffkomponenten mit Melamin, Phenol oder Resorcin zu einer schrittweisen Erhöhung der Feuchtebeständigkeit. Die gewünschte Eigenschaftsverbesserung geht allerdings mit einer entsprechenden Preissteigerung einher, verursacht durch die deutlich höheren Kosten für die reaktiven Komponenten.

Neue Klebstoffsysteme

Es darf anhand der kurzen Einführung festgestellt werden, dass der Markt Klebstoffe zur Verfügung hat, mit denen die normativen Anforderungen erreichbar und die Auflagen der zulassenden Stellen erfüllbar sind. Ohne diese wären die nachweisbaren Erfolge des Holzin- genieurbaus in Europa nicht möglich gewesen. Werden Bauteile einer höheren Feuchtebe- anspruchung ausgesetzt, kommen fast ausschliesslich Phenolresorcinformaldehydharze zum Einsatz, erkennbar durch die charakteristische, tiefbraune Klebfugenfarbe. Ungeachtet dieser Dominanz sind Neuorientierungen und Weiterentwicklungen der Holz-Klebtechnologie vorzunehmen, um den steigenden Qualitätserwartungen auf Abnehmerseite entsprechen zu können, um auf Änderungen auf dem Rohstoffmarkt (neue, unbekannte Holzarten, veränderte Eigenschaften) vorbereitet zu sein und damit die Qualität und die Konkurrenzfähigkeit von Holz- oder holzbasierten Produkten zu verbessern.

So haben sich neben den Polykondensationsklebstoffen in den letzten Jahren einzelne Polyadditionsklebstoffe als alternative Systeme im Holzleimbau durchgesetzt, vor allem die ein- komponentigen Polyurethane. Für eingeleimte Gewindestangen, für Baustellenverklebungen und für die Verklebung von faserverstärkten Kunststofflamellen kommen Epoxid-Systeme zum Einsatz. Diese Polyadditionsklebstoffe zeichnen sich im allgemeinen durch eine ausge- zeichnete Trockenfestigkeit sowohl zum Holz als auch zu anderen Klebpartnern (Stahl, Kunststoffe) aus. Wie bei den herkömmlichen Harnstoffharzen nimmt die Klebfugenfestigkeit allerdings auch bei diesen Systemen unter Feuchteeinwirkung deutlich ab.

Um die Möglichkeiten des Einsatzes von Polyadditionsklebstoffen unter erhöhter Feuchtebe- anspruchung zu verbessern, wurden im Rahmen einer Forschungszusammenarbeit zwi- schen dem Forest Products Laboratory, Madison (USA) und der Holzabteilung der EMPA Dübendorf orientierende Versuche mit Epoxid-Klebstoffen durchgeführt (Vick et al. 1995).

Die Wirkungsweise von Haftvermittlern

Da Kleben in erster Linie ein Oberflächenphänomen ist, sollten Verbesserungen der Klebe- beständigkeit in den geplanten Versuchen über eine Modifikation der Oberflächen angestrebt werden. Hier unterscheidet man zwischen mechanischen (z.B. Aufrauung), physikalischen (Plasmabehandlungen, Beflammungen) und chemischen Verfahren (Ätzen, Primern). Zur gezielten Veränderung der Oberflächenrauheit und dem Einfluss auf die Klebegüte finden sich in der Literatur widersprüchliche Angaben, eine Optimierung der Feuchtebeständigkeit allein über eine bessere Verankerung des Klebstoffs schien unwahrscheinlich. Die physikali- schen Verfahren sind teuer, energieintensiv und bisher nur im Laborverfahren erprobt. Haft- vermittler, allgemein auch als Primer bekannt, werden seit Jahrzehnten erfolgreich bei Metal- len, keramischen Werkstoffen, Kunststoffen und hochentwickelten Composites eingesetzt, um die Beständigkeit von Klebverbindungen zu verbessern. Dagegen war eine derartige Vorbehandlung bei Holzoberflächen vor deren Verklebung bisher nicht praxisüblich; eine Literaturquelle allerdings verwies auf die grundsätzlichen Möglichkeiten: Caster (1980) be- richtet von Holz-Epoxy-Verklebungen, die nach intensiver Aussenwitterung gleichwertige und sogar bessere Klebfestigkeiten zeigten als Verklebungen mit herkömmlichen Klebstof- fen. Die Holzproben waren vor der Epoxy-Verklebung mit einer 2%igen wässrigen Lösung mit Polyethylenimin (PEI) behandelt worden.

Primer, d.h. das Aufbringen einer chemisch reaktiven Komponente auf die Substratoberfläche vor der eigentlichen Klebstoffapplikation soll zur Verbesserung des Klebverbunds führen. Prinzipiell ist der Aufbau von solchen Haftvermittlern in Abbildung 1 dargestellt. Sie bestehen aus drei Teilen: einer polaren Gruppe, die starke intermolekulare Wechselwirkungen eingehen kann; einem hydrophoben Abstandhalter, der verhindert, dass die reaktiven Teile des Moleküls intramolekulare Wechselwirkungen eingehen und zudem eine gewisse Ausrichtung der Moleküle bewirkt. Am anderen Ende befindet sich eine Gruppe mit hoher Oberflächenenergie, die die Benetzung zum Klebstoff fördert. Wegen ihrer bifunktionellen Eigenschaften sind Primer in der Lage, Werkstoffe miteinander zu verbinden, die an sich inkompatibel zueinander sind. Bekannteste Form sind organische Siliziumverbindungen (sog. Silane), die u.a. zur Verbundglasscheiben-Herstellung eingesetzt werden.

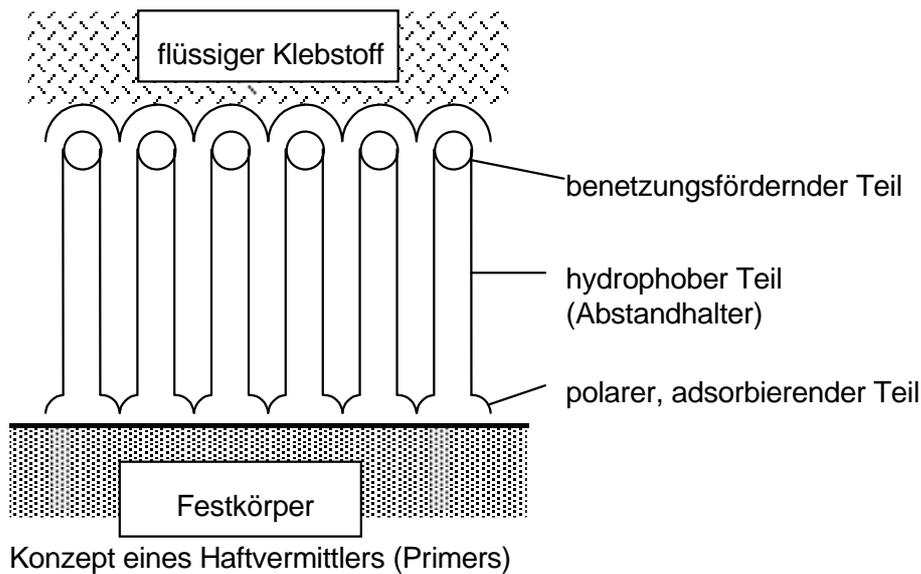


Abbildung 1. Prinzipieller Aufbau von Haftvermittlern

Ergebnisse von Delaminationsversuchen

Zur angestrebten Beurteilung der Feuchteresistenz der Klebverbindungen wurden die Vorschriften der amerikanischen ASTM Specification D 2559 (ASTM 1992) herangezogen, die die Anforderungen für die Klebfugenöffnung von tragenden laminierten Holzbauerelementen festlegt (Tabelle 1). Diese Norm entspricht prinzipiell der EN 302, Teil 2, wobei die Beanspruchungsbedingungen als noch härter angenommen werden können: Abschnitte von 8 cm dicken Brettschichtbalken (6 Lagen) werden einem dreiphasigem Delaminationstest unterzogen, mit 1.5 stündiger Dampfbesprühung und anschließender Vakuum-Druck Behandlung unter Wasser als kritischster Testphase. Die anschliessend an 3 Prüfkörpern zu bestimmende Länge der delaminierten Klebfugen auf den Hirnholzseiten darf nicht mehr als 5% der Gesamtklebfugenlänge der Querschnitte übersteigen.

Tabelle 1: Prüfzyklus der ASTM Specification D 2559 (ASTM 1992)

	Zeit in Minuten
--	-----------------

Vakuum-Saug in Wasser	5		5					5		5		
Druck-Saug in Wasser		60		60			40			60		60
Trocknung bei 65 °C					1200			1200				1200
Heissdampf 100 °C						90						
Zyklus	1				2				3			

In einer ersten Phase wurde die von Caster (1980) berichtete Vorbehandlung mit PEI nachgestellt. Die mit nordamerikanischen Fichtenholz (*P. sitchensis*) hergestellten Proben zeigten zwar deutliche Verbesserungen im Delaminationsverhalten gegenüber den nicht vorbehandelten Vergleichsproben (24% vs 55%; 22% vs 31%), lagen aber noch weit über den vorgegebenen 5% Sollwerten.

Eine weitere Literaturrecherche führte zu einer Behandlungsart, die in der Autoreifenproduktion zur Verbindung der textilen Gewebeerstärkungen mit der Kautschuk-Gummimatrix angewendet wird. Die dort eingesetzten Haftvermittler beinhalten Komponenten, die auch für die herkömmliche Holzverklebung eingesetzt werden: Resorcin und Formaldehyd, angesetzt in verdünnter Natronlauge in einer Lösung, die zu mehr als 90% aus Wasser besteht (Solomon 1990). Nach Optimierungen der Rezeptur, Reaktionszeit, Auftragsmenge und Trockenzeit dieses mit HMR (Hydroxymethyliertes Resorcin) bezeichneten Primers ergaben erste Anwendungen auf Holz signifikante Verbesserungen der Delaminationswerte unter den 5% Sollwert der ASTM Norm (s. Abb. 2). Die benutzte und als amerikanisches Patent angemeldete Rezeptur des Primers ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Zusammensetzung des HMR Primer (US Patent Nr. 5'543'487, Aug. 1996)

	% Gewicht
Destilliertes Wasser	90.43
Resorcin kristallin	3.34
Formaldehyd (37%ig)	3.79
NaOH (10%ig)	2.44

Als optimale Reaktionszeit nach Anmischung der Lösung wurden 4 Stunden ermittelt. Anschliessend wurden der fertigen Lösung noch 0.1% Natriumdodecylsulfat zur Verbesserung der Benetzung zugegeben. Der Auftrag auf die Lamellen erfolgte im Labor durch Streichen, als Auftragsmenge wurden 150 g/m² appliziert. Die Lamellen wurden ca. 1 bis 4 Stunden im Standardklima zur Abtrocknung gelagert, bevor die Klebstoffapplikation erfolgte.

Nachdem die Verbesserung der Feuchtebeständigkeit bei der Kombination Fichtenholz/Epoxyklebstoff unerwartet erfolgreich verlief, wurden insbesondere am Forest Products Laboratory eine Anzahl weiterer Klebstoffsysteme und Holzarten/Behandlungen geprüft. Dabei stand u.a. im Vordergrund, dass vor allem für die Aussenanwendung in den Vereinigten Staaten noch immer CCA-imprägniertes Holz (Südkiefer, Southern Yellow Pine) verwendet wird, dessen Verklebungseigenschaften so problematisch sind, dass selbst Phenolresorcin-klebstoffe (PRF) nur unter optimaler Einstellung die Anforderungen die Delaminationstests erfüllen. Weiter sollte geprüft werden, ob auch Melaminklebstoffe mit dem Primer in der extremen Aussenanwendung eingesetzt werden können. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse von verschiedenen Versuchsserien dargestellt (Vick et al. 1995, Vick 1995 u. 1997).

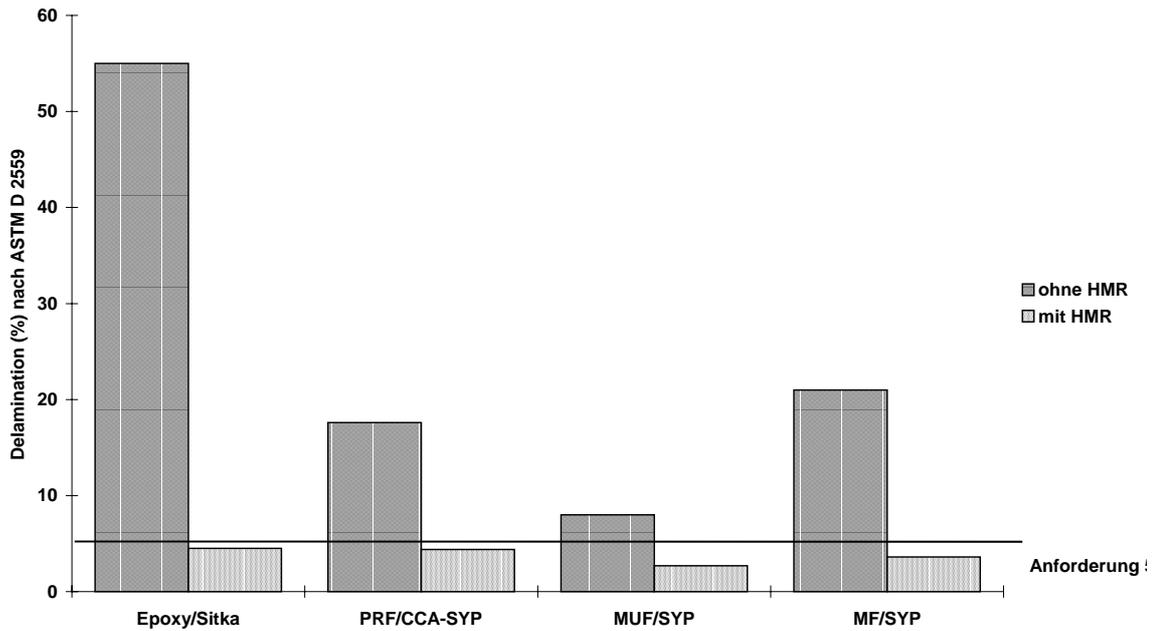


Abbildung 2: Vergleich der Klebfugendelaminationen unterschiedlicher Holz-Klebstoffkombinationen mit und ohne Haftvermittler nach ASTM D2559

In einer jüngsten Studie wurden auch die 1 K-PUR Klebstoffe an Nadel- und Laubholz untersucht (Vick, Okkonen 1999). Für beide einbezogenen Klebstoffsysteme und Holzarten verbesserte der Primer die Delamination signifikant. (Abbildung 3).

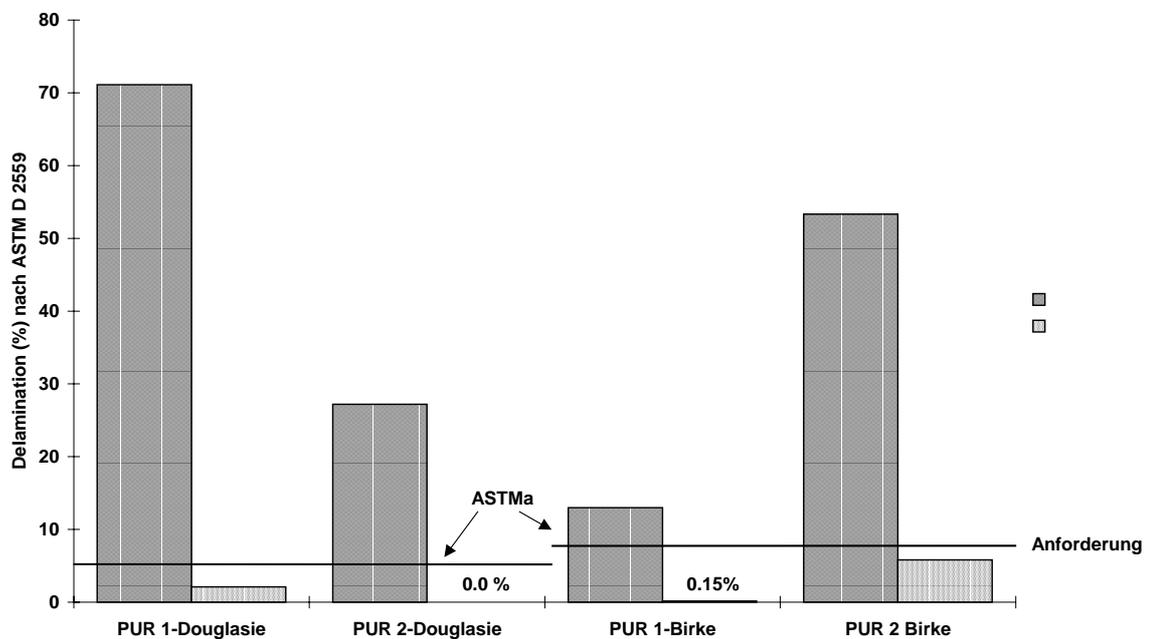


Abbildung 3: Vergleich der Klebfugendelaminationen von 2 1K-PUR Klebstoffen an Nadel und Laubholz (ASTMa: die Sollwerte für Laubhölzer betragen 8%, für Nadelholz 5%)

Auch die Scherfestigkeitswerte nach Wiedertrocknung liegen stets besser als bei nichtbehandelten Proben, wobei vor allem der signifikant höhere Holzbruchanteil auffällt, der die Grenzschichtausbildung der gepressten Flächen visualisiert, insbesondere bei Kastanienholz (Abb. 4)

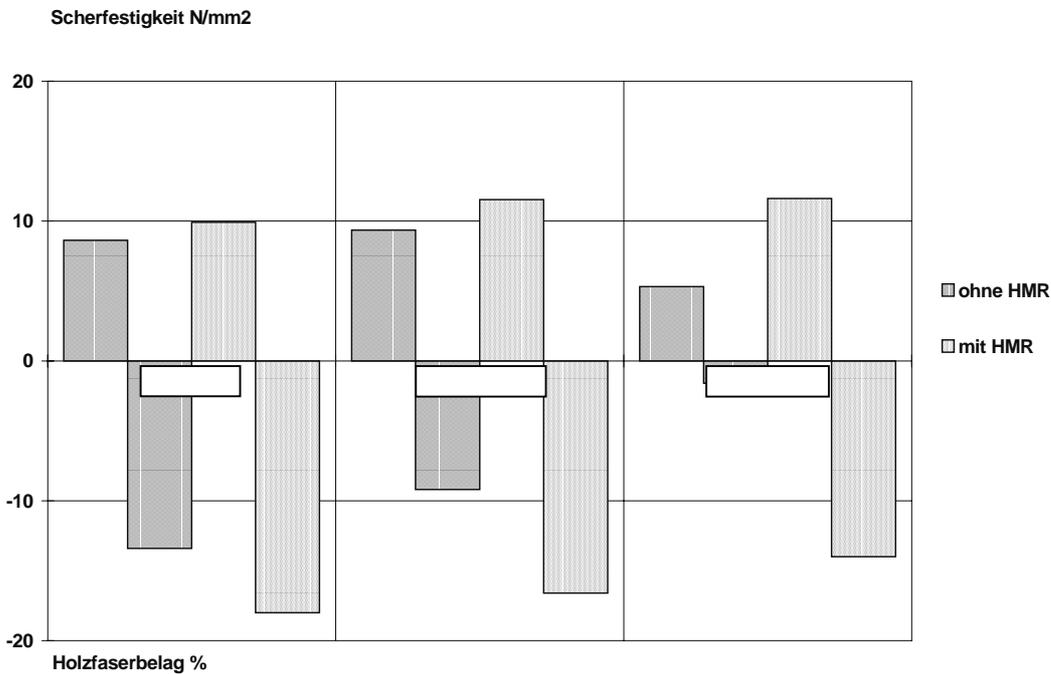


Abbildung 4: Vergleich der Scherfestigkeitswerte nach Wiedertrocknung und der Holzfaseranteile

Abbildung 4 zeigt die Aufnahme von 3 gepressten Probekörpern nach der zyklischen Wärme-Druck-Belastung. Es ist zu erkennen, dass die Klebfugen weitgehend intakt sind, während die aufgetretenen Schwindspannungen im Holz deutliche Risse verursacht haben.

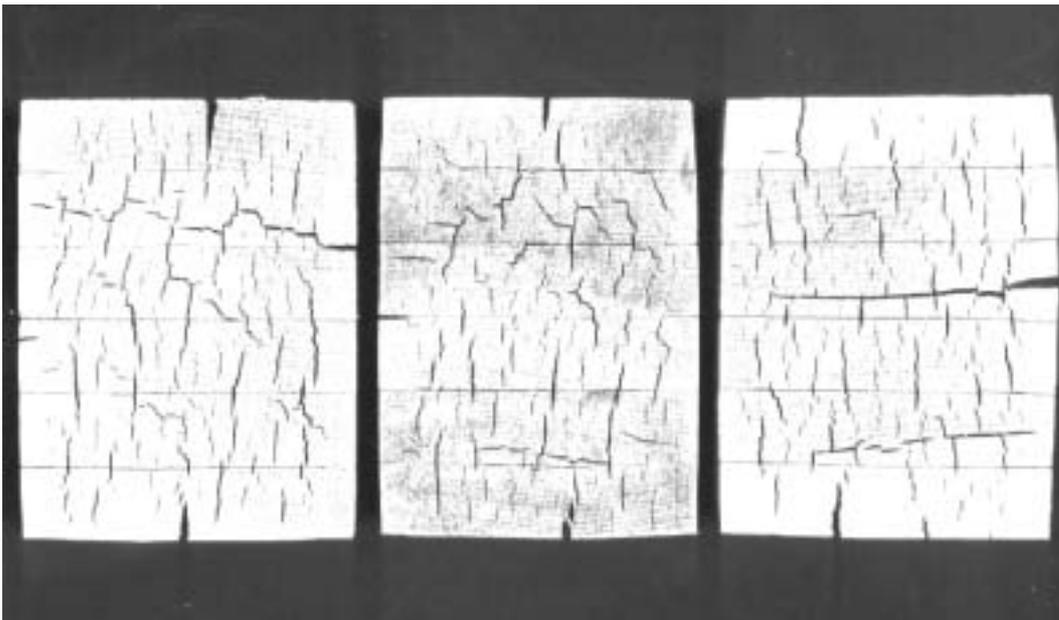


Abbildung 5. HMR behandelte Sitka-Fichte Proben nach der Wechselbelastung

Es wird vermutet, dass die Ursache für die hervorragende Wirkung des Primers sowohl in der Ausbildung von chemischen Bindungen zwischen den Carboxygruppen der Resorcinmoleküle und den reaktiven Bausteinen des Holzes bzw. des Klebstoffes liegt, verstärkt durch eine Vielzahl von Wasserstoffbrücken zu den sekundären OH-Gruppen der Holzkomponenten.

Zusammenfassung und Umsetzung

Die durchgeführten Untersuchungen haben zur Entwicklung einer Verlebetechnologie für Brettschichtholz geführt, die auf der Wirkungsweise eines Primers beruht. Das wässrig eingestellte Formaldehyd/Resorcin-Gemisch (ca. 5% Feststoffanteile) wird auf die Holzlamellen aufgetragen, die anschliessend bis zur Verklebung rund 4 Stunden trocknen. Die bisherigen Erfahrungen belegen

Das Verfahren führt zu Klebstoffugen, die extremen Feuchtebeanspruchungen standhalten. Das Verfahren verbessert die Verklebungseigenschaften von schwierig zu klebenden Holzoberflächen (schwere, harzreiche Nadelhölzer, inhaltsstoffreiche Laubhölzer, salzimprägnierte Hölzer).

Der Primer ist wirksam bei verschiedenen Klebstoffsystemen in Kombination mit verschiedenen Holzarten (MUF, PUR, RF, Epoxid).

Zur Umsetzung in die BSH-Fertigungspraxis müssen die Wirkung und die potentiellen Möglichkeiten des Verfahrens zunächst auch in Europa breiter bekannt gemacht und die Eingliederung des Zusatzschrittes in den industriellen Fertigungsablauf geprüft und realisiert werden. Das Verfahren wird sich kaum in der Massenproduktion etablieren, sondern bietet eine Alternative für Spezial- und Nischenanwendungen. Der produktionstechnische Mehraufwand dürfte kostenmässig nicht wesentlich zu Buche schlagen, u.U. kann die ausgewiesene Trocknungszeit durch forcierte Trocknung in einem Trockenkanal wesentlich verkürzt werden. Der reine Materialpreis für den Primer pro m³ BSH wird auf 45 – 50 DM geschätzt. Der notwendige Mehraufwand wird sich nur dann lohnen, wenn die verbesserte Verklebungsqualität dem Brettschichtholz am Markt neue Absatzchancen eröffnet. Dies ist vor allem in den Bereichen zu erwarten, wo bisherige Technologien nicht ausreichend effizient (z.B. bei hoher Feuchtebeanspruchung und bei schwierig zu klebenden Holzarten infolge hohe Dichte, hohem Extraktstoffgehalt, Imprägniermitteln) oder zu teuer waren (PRF Klebstoffe). Laufende Forschungsarbeiten zielen darauf ab, den Primer anwendungsfreundlicher als 2 Komponentensystem anzubieten zu können, der nach Mischung sofort einsatzfähig wäre.

Die gegenwärtig zu verzeichnende erfreuliche Zunahme der Holzanwendungen im Bauwesen betrifft auch Einsatzbereiche, in denen Holz einer erhöhten Feuchtebeanspruchung ausgesetzt ist. In den mitteleuropäischen Ländern werden Holzanwendungen der Gefährungsklasse 3 nach EN 335 aus ökologischen Gründen vermehrt mit Holzarten ausgeführt, die eine ausreichende biologische Resistenz aufweisen, aber wegen des erhöhten Gerbsäure- oder Extraktstoffanteils schwierig zu verkleben sind. In anderen Ländern werden freibewitterte Holzbauteile nach wie vor mit Schutzmitteln imprägniert. Für beide Fälle liefert der HMR-Primer eine praxistaugliche Möglichkeit, um die Verklebungsqualität auch unter den erhöhten Feuchtebelastungen dauerhaft zu gewährleisten.

Literatur

- Caster D. 1980. Correlation between exterior exposure and automatic wet boil test results. In: Wood adhesion. Research, application, and Needs. Symposium proceedings, p. 179-188, Forest Products Laboratory, Madison, Wi.
- Solomon T.S. 1990. Bonding textiles to rubber. In Skeist, I (ed):Handbook of adhesives. Second edition. Van Nostrand Reinhold pp. 661-668
- Vick C.B. 1995. Coupling agent improves durability of PRF bonds to CCA-treated Southern Pine. Forest Prod. J. 45(3):78-84
- Vick C.B. 1997. Enhanced adhesion of melamine-urea and melamine adhesive to CCA-treated Southern Pine lumber. Forest Prod. J. 47(7/8): 83-87
- Vick C.B., Okkonen A. 1999. Enhanced durability of one-part polyurethane bonds to wood. Manuscript accepted for publication.
- Vick C.B., Richter K., River B.H., Fried Jr., A.R. 1995. Hydroxymethylated resorcinol coupling agent for enhanced durability of Bisphenol-A-Epoxy bonds to Sitka spruce. Wood and Fiber Science 27(1)2-12.