

Entwicklung eines kombinierten mechanisch-klimatischen Schnellalterungsverfahrens für konstruktive Holzwerkstoffe (TimberAge)

IGF-Vorhaben

01IF21822N

Laufzeit

01.05.2021 bis 31.12.2024

Forschungsvereinigung

Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. (iVTH)
Riedenkamp 3
38108 Braunschweig

Beteiligte Forschungseinrichtungen

¹Universität Kassel
Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff)
Kurt-Wolters-Str. 3
34125 Kassel

²Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI
Fachbereich Holzwerkstoff- und Naturfasertechnologie (HNT)
Riedenkamp 3
38108 Braunschweig

Ansprechpartner

Dr. Andreas Winkel (a.winkel@uni-kassel.de)¹
Dr. Steffen Sydow (steffen.sydow@wki.fraunhofer.de)²

Motivation

Holz als natürlicher Werkstoff stellt Hersteller geklebter Verbunde wie Schicht- und Sperrhölzer, insbesondere für den Anwendungsbereich Konstruktiver Holzbau, vor spezifische klebtechnische Herausforderungen. Im Gegensatz zu synthetischen Materialien wie Metallen, Kunststoffen oder Glas weist Holz ein anisotropes Materialverhalten auf (bezogen auf die drei Wuchsrichtungen), sodass sich bspw. Dimensionsänderungen durch Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe unterschiedlich stark ausprägen (anisotropes Quell- und Schwindverhalten). Zusätzlich besteht die Gefahr, dass der Klebstoff durch Holzinhaltsstoffe chemisch abgebaut wird. Der Verbund muss jedoch über seine geplante Lebensdauer hinweg den genannten Einflüssen standhalten.

Zur Beurteilung des Alterungsverhaltens von Holzwerkstoffen im Außenbereich stehen zahlreiche etablierte Prüfverfahren zur Verfügung. Diese sind jedoch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) oft schwer umzusetzen und/oder haben eine begrenzte Aussagekraft. Beispielsweise sind die Ergebnisse einer Freibewitterung aufgrund klimatischer Einflüsse nur wenig reproduzierbar. Zudem erschwert dieses mehrjährige Verfahren die Markteinführung und Zertifizierung neuer Klebstoffe und holzbasierter Materialien, was für KMU ein erhebliches wirtschaftliches Risiko darstellt.

Im Gegensatz dazu basieren Methoden der beschleunigten bzw. künstlichen Alterung (Schnellalterungsverfahren) meist auf extremen Bedingungen wie hohe Temperaturen, um eine signifikante Abnahme der Verbundkennwerte effizient innerhalb einer kurzen Zeitspanne zu erreichen. Diese harschen Einflussfaktoren entsprechen jedoch nicht den realen Einsatzbedingungen. Viele beschleunigte Alterungsszenarien berücksichtigen zudem nicht alle Aspekte, die bei der natürlichen Alterung eine Rolle spielen. Besonders das *wiederholte* Quellen und Schwinden, das zu sich fortwährend ändernden Spannungszuständen im Material führt, wird in Schnellalterungsverfahren oft nur unzureichend berücksichtigt; die Holzverbunde werden in der Regel nur einmal oder maximal über wenige Zyklen befeuchtet und getrocknet. Gleiches gilt auch für statische oder dynamische mechanische Lasten, die während des gesamten Lebenszyklus kontinuierlich auf die Holzwerkstoffe einwirken.

Zielsetzung des Vorhabens

Zusammenfassend sollten daher im Vorhaben TimberAge insbesondere für KMU der Holzindustrie praktikable und wirtschaftliche Lösungen gefunden werden, um die Effizienz ihrer Produktentwicklung und -prüfung zu verbessern. Dabei war eine Zielsetzung – unter dem Stichwort „Künstliche Alterung „realer“ gestalten“ – die Entwicklung neuer beschleunigter Alterungsverfahren, welche das Quellen und Schwinden in erhöhtem Maße abbilden. Gleichzeitig sollten aber auch andere Alterungsfaktoren wie hygrothermische Einflüsse und chemische Abbauprozesse in der Klebfuge berücksichtigt werden. Im Laufe des Vorhabens wurde darüber hinaus der zentrale Arbeitsinhalt um die Fragestellung erweitert, inwieweit sich auch die Freibewitterung von Holzwerkstoffen beschleunigen lässt.

Künstliche Alterung „realer“ gestalten

Entwicklung eines neuartigen Immersionstests

Neben einem wechselnden Feuchtegehalt wirken sich während der Alterung auch Holzinhaltsstoffe negativ auf die Klebfuge aus. Um dies nachzuvollziehen, wurden für erste Untersuchungen Buchenspäne mit Wasser ausgekocht (1 kg Späne, 12 Liter Wasser) und der erhaltene Sud als Immersionsmedium zur Verbundalterung verwendet. Im Vergleich zur Einwirkung reinen Wassers verminderte der Buchenextrakt die mechanische Performance nochmals deutlich. Als Hauptursache wurde primär der pH-Wert des Extraktes als Ursache herangezogen. Yamaguchi et al. [Yam1989] berichteten bspw. über einen Abfall der Bindefestigkeiten von Sperrholzproben, wenn diese in Pufferlösungen gelagert werden. Für neuartige Immersionstests wurde daher eine Pufferlösung mit $\text{pH} = 2$ auf Basis von Salzsäure erarbeitet. Ergänzend zur chemischen Beeinträchtigung und wiederholten Quell- und Schwindeffekten sollten in der Klebung weitere Spannungen erzeugt werden. Dies wurde durch verdampfendes und gefrierendes Wasser realisiert, da bei beiden Vorgängen Expansionsdruck im Verbund entsteht. Der erarbeitete Alterungszyklus ist in Abbildung 1 aufgeführt. Um das Eindringen der Medien (Pufferlösung und Wasser als Vergleichssystem) in die Prüfkörper zu beschleunigen und ihren Einfluss im Sperrholz zu homogenisieren, wurde für die Immersion eine Unterdruckkammer verwendet. Darüber hinaus wird ein Ofen und ein Tiefkühlfach benötigt. Bei der Entwicklung der Methodik wurde Wert daraufgelegt, dass sie für KMU in finanzieller Hinsicht realisierbar ist und ein kompletter Zyklus innerhalb einer 5-tägigen Arbeitswoche abgebildet werden kann.



Abbildung 1: Entwickelte Alterungsmethodik auf Basis einer Pufferlösung und harschen Temperaturwechseln. Um sicherzustellen, dass etwaige Performanceverluste der Pufferlösung zuzuschreiben sind, wurde zu Vergleichszwecken ein paralleler Alterungszyklus nur mit Wasser durchgeführt.

Abbildung 2 fasst die Ergebnisse der unterschiedlichen Prüfzyklen (Medium, Dauer) zusammen. Bei jedem untersuchten Klebstoffsystem sinkt für jedes Medium (Wasser W, Puffer P) die Scherfestigkeit mit zunehmender Zyklenzahl. Darüber hinaus ist die Abnahme der mechanischen Performance stets viel ausgeprägter bei der Einwirkung der sauren Pufferlösung; gerade für die Klebstoffsysteme Jowapur 686.60 und Kauramin 683 fällt die Abnahme zum Teil mehr als doppelt so hoch aus als für das Vergleichsmedium Wasser. Daher kann angenommen werden, dass die untersuchten Klebstoffe durch Einwirkung von Wasser allein nicht genügend Säure erzeugen, um einen Abbau der Klebung „aus sich heraus“ zu erreichen.

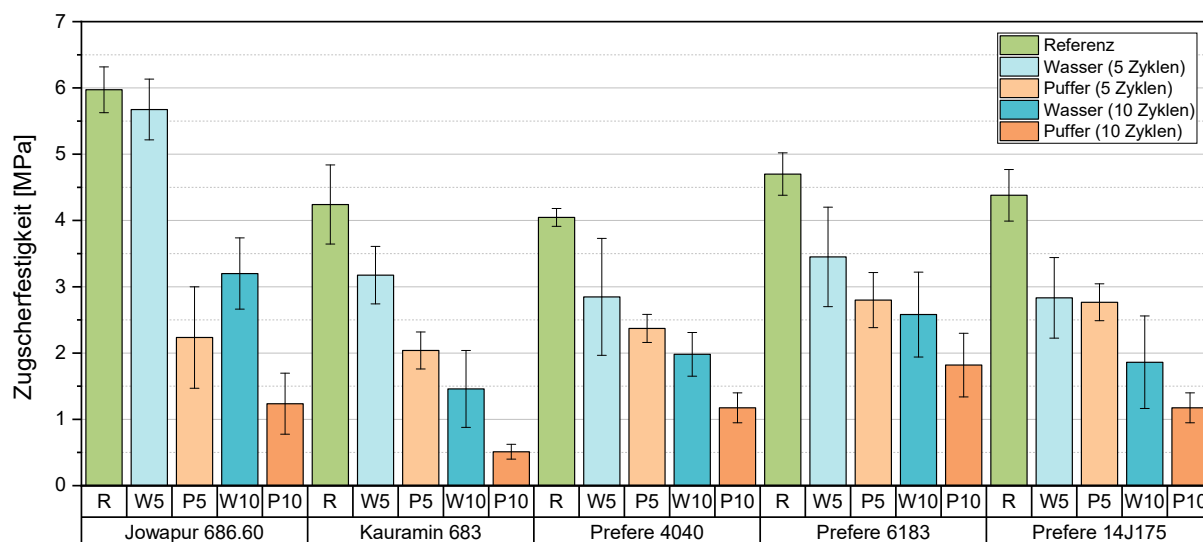


Abbildung 2: Vergleichende Darstellung der Zugscherfestigkeiten nach dem in Abbildung 1 aufgeführten Alterungszyklus.

Durch die Einwirkung der Pufferlösung änderte sich zudem das Bruchverhalten der Prüfkörper massiv. Während zu Beginn noch verstärkt Substratbruch beobachtet werden konnte, wurden mit zunehmender Prüfzeit verstärkt Adhäsionsbrüche registriert.

Eine ergänzende Auswertung hatte den durch die Einwirkung der Medien ausgelösten Gewichtsverlust zum Inhalt. Die Prüfkörper wurden daher nach Ablauf der 10 Alterungszyklen gewogen und ihre Masse in Relation zu ungealterten Proben gesetzt (Abbildung 3). Deutlich wird besonders eine signifikante Gewichtsabnahme für die Klebstoffsysteme Jowapur 686.60, Kauramin 683 und Prefere 4040. Da die jeweiligen Klebstoffe nur einen Bruchteil der Probenmasse ausmachen, ist davon auszugehen, dass neben dem chemischen Abbau der Polymerstruktur auch massiv die Holzstruktur angegriffen wird, was erst in Kombination zu den in Abbildung 2 dargestellten Alterungseffekten führt.

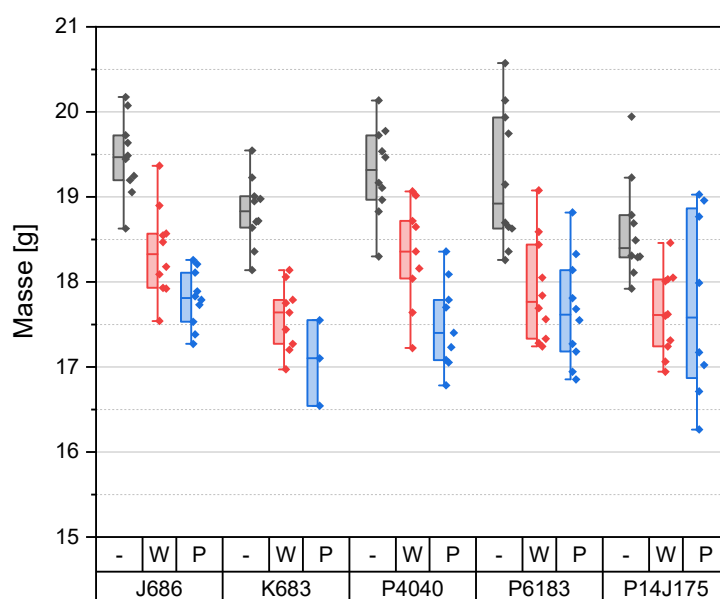


Abbildung 3: Massen der Prüfkörper in Abhängigkeit des Alterungsmediums (- ungealtert, W Wasser, P Puffer) nach 10 Alterungszyklen.

Um sicherzustellen, dass die Alterungsmethodik auch auf die etablierten Prüfkörper nach DIN EN 302 angewendet werden kann, wurden die Untersuchungen für drei Klebstoffe in Form von 5 Zyklen auf diese Probengeometrie ausgeweitet. Deutlich erkennbar ist auch hier eine drastische Abminderung der Längszugscherfestigkeit durch Einwirkung des Säurepuffers.

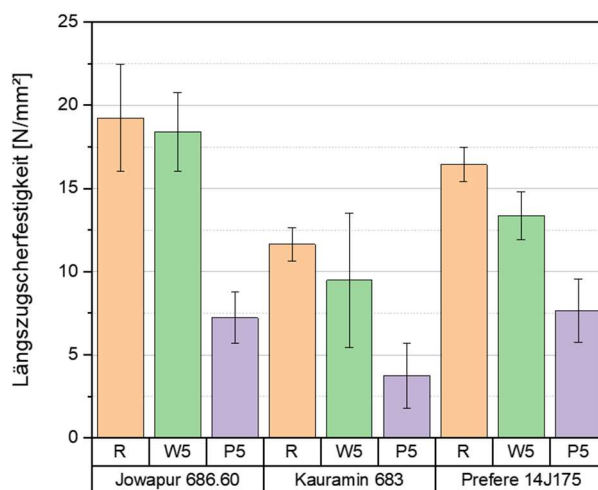


Abbildung 4: Einfluss des entwickelten Alterungsszenarios auf die Längszugscherfestigkeit von Buchensperrholz.

Entwicklung einer dynamischen Prüfvorrichtung

Aus Voruntersuchungen wurde der Einfluss dynamischer Lasten auf die mechanischen Kennwerte von Holzwerkstoffen deutlich. Daher wurde eine Belastungseinheit entwickelt, bei der folgende Aspekte im Vordergrund standen:

- Dynamische Belastung möglich
- Verschiedene Prüfkörpergeometrien im Nachgang nutzbar
- Einfache Montage
- Einfache Handhabung
- Kosteneffizient

In diesem Zusammenhang wurde eine dynamische Dreipunktbiegung als Belastungsszenario gewählt. Auf diese Weise können nicht nur mehrere längliche Prüfkörper, sondern auch Sperrholzplatten belastet werden. Darüber hinaus wird so im Nachgang der mechanischen Alterung die Fertigung unterschiedlicher Prüflinge möglich, die dabei unterschiedlichen Normen der zerstörenden Prüftechnik genügen.

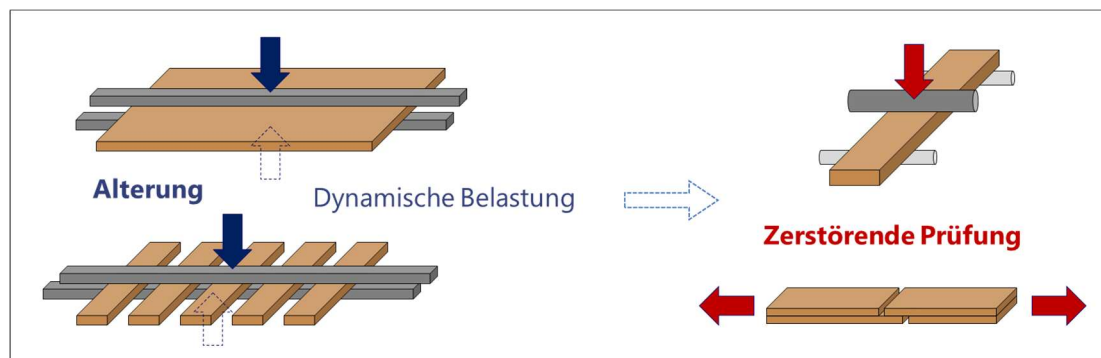


Abbildung 5: Mit der dynamischen Belastungsvorrichtung abgebildete Lastfälle und mögliche zerstörende Prüfmethode.

Beschreibung der Vorrichtung

Bezogen auf die Maße der in TimberAge verwendeten Biegeprüfkörper ($11,5 \times 50 \times 280 \text{ mm}^3$) ist die Prüfvorrichtung für bis zu 5 Proben gleichzeitig ausgelegt. Es kann zwischen einseitiger und zweiseitiger Belastung gewählt werden, d. h., dass der Hub sowohl von oben als auch von unten erfolgen kann. Die Biegung erfolgt bei einer zweiseitigen Belastung in der Regel wechselseitig. Über die Bedienelemente an der Steuerung kann die Anzahl der Lastwechsel in 100er-Schritten frei eingestellt werden. Die Prüfkraft wird durch drei Pneumatik-Zylinder je Seite aufgebracht und kann durch einen Druckminderer frei zwischen 0,3 kN und 5,9 kN eingestellt werden. Zum Schutz vor ungewolltem Eingreifen in die laufende Prüfung ist die Prüfvorrichtung allseitig mit Plexiglas eingefasst.



Abbildung 6: Konstruktion und Umsetzung der dynamischen Belastungseinheit.

An Biegeprüfkörpern (Buchensperrholz/Jowapur 686.60) wurden schließlich dynamische Belastungstests, vorerst 400.000 einseitige Zyklen (ES), durchgeführt. Der Druck wurde dabei so eingestellt, dass sich eine Durchbiegung um 6 mm für eine Haltezeit von 5 Sekunden ergab. Die Zeitspanne zwischen den Belastungszuständen betrug dabei 4 Sekunden, um das Heben und erneutes Senken der Biegefinne zu berücksichtigen. Die Gesamtdauer betrug auf diese Weise etwa 41 Tage. Im Anschluss an die erneute Überprüfung der Vorrichtung und der mechanischen Charakterisierung der Proben schloss sich ein weiterer Belastungszyklus an, bei dem die Prüflinge wechselseitig (beidseitig, BS) gebogen wurden (jeweils in Summe 200.000 Zyklen von oben/unten). Die Biegekennwerte nach beiden Belastungstests sind in Abbildung 7 zusammengefasst.

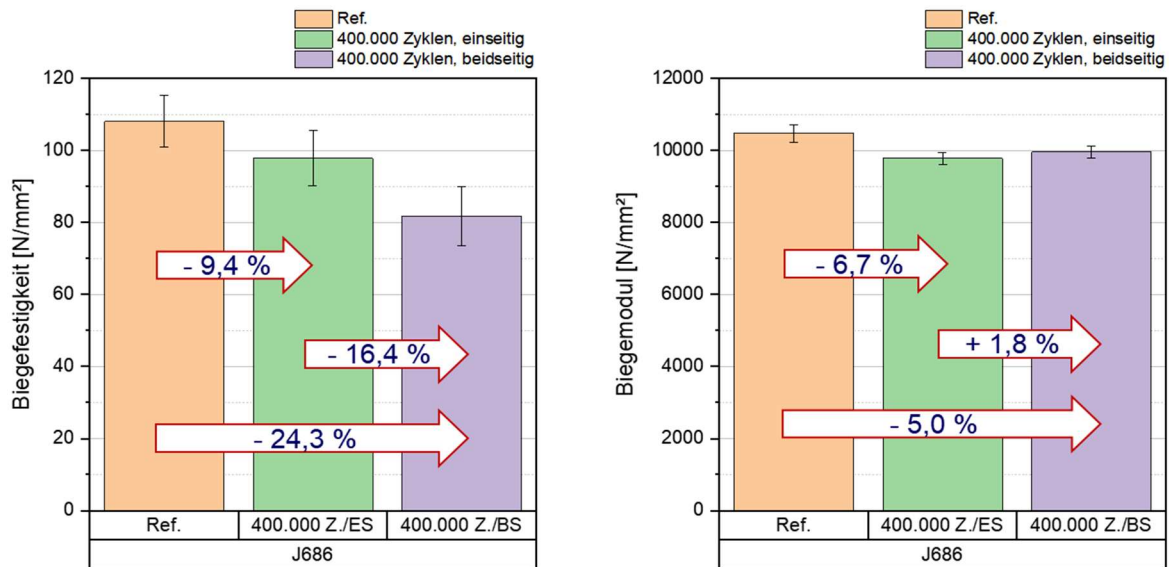


Abbildung 7: Biegekennwerte nach dynamischer einseitiger und beidseitiger Biegelast (400.000 Zyklen) für Buchensperrholz, gefertigt mit Jowapur 686.60.

Im Vergleich zum Referenzwert wurde eine deutlichere Abnahme der Biegefestigkeit über die einseitige und beidseitige Belastung ermittelt. Eine einseitige Belastung verminderte die Biegefestigkeit um 9,4 %, während eine beidseitige Biegung eine Abminderung um etwa 24 % als Resultat hervorbrachte. Der Einfluss der mechanischen Alterung auf den Biegemodul ist allerdings weniger stark ausgeprägt.

Zusätzlich wurde überprüft, inwieweit ein die dynamische Belastung überlagerndes Quellen und Schwinden eine zusätzliche Abminderung der mechanischen Performance bedingt. Erneut wurden 5 Biegeprüfkörper beidseitig im Wechsel 400.000mal belastet. Alle 4 Tage wurde die Vorrichtung gestoppt und ein feuchter Schwamm in der Biegezone für etwa 30 Minuten aufgelegt, um dem Sperrholz zu ermöglichen, zusätzliche Feuchtigkeit aufzunehmen. Anschließend wurde die Biegung der Proben fortgesetzt. Im Vergleich zu den Belastungsszenarien ohne zusätzliche Quell- und Schwindeffekte bildeten sich im Probenquerschnitt deutliche Risse im Bereich der dynamischen Last aus. Für eine effiziente Verbundalterung ist daher eine Kombination von mechanischer Wechsellast und Quell- und Schwindeffekten einer reinen dynamischen Belastung vorzuziehen.



Abbildung 8: Profilaufnahmen der Sperrholzplatten nach 400.000-maliger wechselseitiger Biegebelastung und gleichzeitigem Überlagern von Quell- und Schwindeffekten.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung praxisnaher Alterungsverfahren für Holzwerkstoffe des konstruktiven Holzbaus wurde eine Methodik erarbeitet, die chemische, thermische und mechanische Belastungen gezielt kombiniert. Dabei steht die realistische Nachbildung realer Einflüsse im Vordergrund: Holzinhaltsstoffe wurden als schädigende Komponente identifiziert und über einen wässrigen Holzextrakt sowie eine definiert saure Pufferlösung ($\text{pH} = 2$) in die Proben eingebracht. Die Immersion erfolgte unter Unterdruck, um eine gleichmäßige und tiefenwirksame Penetration der Medien sicherzustellen. Ergänzend dazu wurde ein zyklischer Temperaturwechsel eingeführt, der durch Gefrieren und Trocknen zusätzliche mechanische Spannungen in der Klebfuge erzeugt.

Zur dynamisch-mechanischen Belastung wurde eine einfache, kosteneffiziente Prüfvorrichtung für Dreipunktbiegung entwickelt, die eine Langzeitbeanspruchung über mehrere Hunderttausend Lastwechsel erlaubt. Besonders wirksam zeigte sich die Kombination aus mechanischer Wechsellast und überlagerter Feuchtebeanspruchung, da so zusätzliche Rissbildungen und eine realitätsnahe Degradationsdynamik im Verbundsystem ausgelöst werden konnten.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass auch Freibewitterungsversuche gezielt beschleunigt werden können, indem die Prüfkörper regelmäßig mit Holzextrakt oder Pufferlösung benetzt werden. Zwar ist die Tiefenwirkung hierbei begrenzt, jedoch lässt sich bereits durch einfaches Besprühen eine deutliche zusätzliche Schwächung der mechanischen Kennwerte erreichen.

In Summe bieten die in TimberAge erarbeiteten Methodiken realitätsnahe und dennoch ökonomisch umsetzbare Möglichkeiten, Klebstoffsysteme bzw. Holzwerkstoffe hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit unter praxisrelevanten Bedingungen zu bewerten. Die Verfahren sind modular, an unterschiedliche Probengeometrien anpassbar und können in einem typischen Arbeitswochenzyklus abgebildet werden. Dies macht sie besonders attraktiv für kleine und mittlere Unternehmen, die auf einfache, aber aussagekräftige Alterungsprüfungen angewiesen sind. Durch die Kombination von chemischer Einwirkung, thermischem Stress und dynamischer Last eröffnen sich zudem neue Ansätze für eine differenziertere Bewertung der Klebstoffalterung, die über konventionelle Prüfmethoden hinausgehen.

Dieser Bericht stellt lediglich einen begrenzten Teil der erzielten Ergebnisse dar. Im Abschlussbericht zum Projekt sind die vollständigen Ergebnisse insbesondere hinsichtlich der Verwendung von Kiefersperrholz enthalten.

Literatur

[Yam1989] Yamaguchi H, Higuchi M, Sakata I (1989) Mokuzai Gakkaishi 35, 801-806; in: Dunky M, Niemz P: Holzwerkstoffe und Leime, Technologien und Einflussfaktoren, Band II, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH (2002).

Das IGF-Vorhaben 01IF21882N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. wurde über die AiF sowie dem DLR Projektträger im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei: Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH e.V.) Riedenkamp 3, 38108 Braunschweig