

A. Kägi · P. Niemz · D. Mandallaz

Einfluss der Holzfeuchte und ausgewählter technologischer Parameter auf die Verklebung mit 1K-PUR Klebstoffen unter extremen klimatischen Bedingungen

Published online: 12 Januar 2006

© Springer-Verlag 2005

Zusammenfassung 1K-PUR Klebstoffe benötigen eine Mindestmenge an Wasser für das vollständige Aushärten. Insbesondere im Winter bei sehr niedrigen relativen Luftfeuchten können teilweise Probleme bei der Verklebung auftreten. Mit der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der geringen Holzfeuchte bzw. Holzoberflächenfeuchte, der Luftfeuchte, der offenen Wartezeit sowie der aufgespritzten Zusatzwassermenge auf das Abbindeverhalten von 1K-PUR Klebstoffen experimentell untersucht. Dazu wurden 3 Klebstoffe mit unterschiedlicher Reaktivität der Fa. Purbond AG/Schweiz eingesetzt. Es konnten dabei deutliche Unterschiede im Verhalten der Klebstoffe nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die in den Verarbeitungsrichtlinien vorgegebenen Parameter unbedingt eingehalten werden müssen. Damit wird eine hohe Prozesssicherheit gewährleistet und ein qualitativ hochstehendes, verleimtes Bauteil ist das Ergebnis.

Influence of moisture content and selected technological parameters on the adhesion of one-part polyurethane adhesives under extreme climatical conditions

Abstract One-part adhesives need a minimum amount of water for a complete reaction. Glueing problems are reported especially during the winter period when the atmospheric humidity is low. The objective of the present investigation was to experimentally determine the impact of changes in the influencing factors such as low wood moisture content, atmospheric humidity, open waiting time and additional water amount on the behaviour of one-part PUR adhesives. Three adhesives from Purbond AG/Switzerland with different reaction speeds were used. Obvious differences in the behaviour of the adhesives could be demonstrated. The investigation shows that technological minimum requirements have to be strictly observed to achieve a sufficient bonding.

A. Kägi · P. Niemz (✉)
Institut für Baustoffe, ETH Hönggerberg, HIF E 25.1, 8093 Zürich, Schweiz
E-mail: niemz@ifb.baug.ethz.ch

D. Mandallaz
Professur für Forstliches Ingenieurwesen, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Schweiz

1 Einleitung

Einkomponenten Polyurethanklebstoffsysteme (1K-PUR) gewinnen im Ingenieurholzbau weltweit zunehmend an Bedeutung. Als wesentliche Vorteile gegenüber Phenolharzen werden genannt:

- Eine relativ schnelle Reaktion/Aushärtung bei Raumtemperatur
- Die helle, transparente und somit farblose Klebstoffe
- Kein Formaldehyd und keine Lösungsmittel im Klebstoff
- Kein zusätzliches Mischen bei der Verarbeitung
- Dauerelastisch, was ein duktileres Verhalten gewährleistet
- Ein im Vergleich zu Harnstoff- und Phenolharzen nach oben hin relativ weiter Bereich der Holzfeuchte, in dem der Klebstoff problemlos einsetzbar ist (auch > 15% Holzfeuchte ist möglich)

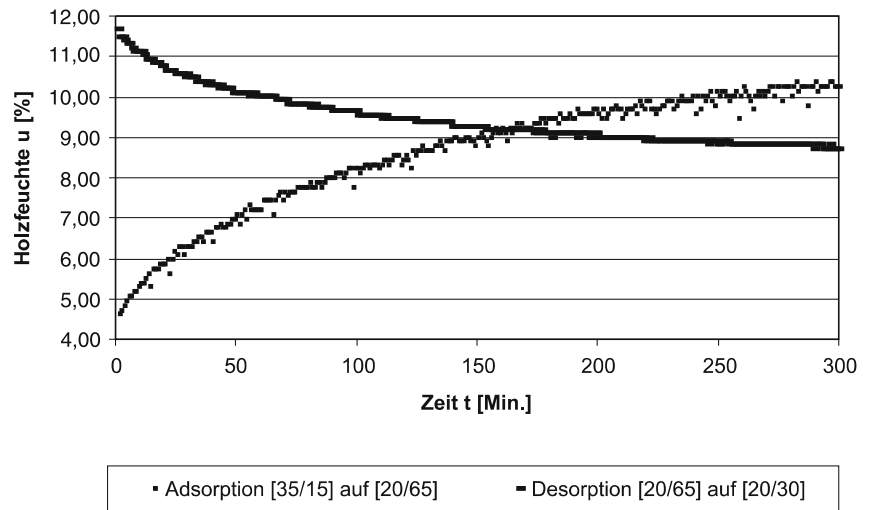
1K-PUR Klebstoffe benötigen zum Aushärten Wasser. Um die nötigen Wassermengen bereitzustellen, gibt es strenge Verarbeitungsrichtlinien, deren Einhaltung in den Holzbaubetrieben überwacht werden muss. Erfolgt dies nicht, kann es bei einzelnen Klebstoffen bei extrem niedriger Holzfeuchte/Holzoberflächenfeuchte und/oder Luftfeuchten zu Problemen bei der Verklebung kommen. Dieser Effekt ist aus der industriellen Praxis bekannt. Insbesondere in den Wintermonaten können in nicht oder nicht ausreichend klimatisierten Hallen niedrige rel. Luftfeuchten bis unter 30% auftreten. Viele Anwender versprühen daher in der Produktionshalle Wasser, um die Luft zu befeuchten oder sie sprühen zusätzlich Wasser auf die zu verklebenden Lamellen.

Um die Notwendigkeit der Einhaltung dieser Vorschriften und das Verhalten verschiedener Klebstoffsysteme zu testen, wurden Laborversuche unter extremen Bedingungen, die weit von den Verarbeitungsrichtlinien abweichen, durchgeführt.

Sauer (2002) erwähnt, dass reklamierte Schäden (offene Fugen, ungenügende Festigkeiten und nur ungenügend vorhandene Holzbruchanteile nach zerstörender Festigkeitsprüfung) dokumentiert und auf eine Unterschreitung der vorgegebenen Holzfeuchteuntergrenze zurückgeführt wurden.

Abb. 1 Adsorptions- und Desorptionsverhalten der Oberfläche von Fichtenholz (gemessen an einem Furnier mit 0,9 mm Dicke)

Fig. 1 Adsorption and desorption behaviour of the surface of spruce (measured on an 0.9 mm thick veneer)



Solch geringe Holzfeuchten ($u \leq 8\%$) können z.B. entstehen, wenn die gesamte Holzcharge sehr stark heruntergetrocknet wurde. Unter Berücksichtigung der Streuung der Holzfeuchte im Stapel können einzelne Bretter den Mittelwert deutlich unterschreiten. Werden die Bretter zudem in einer Halle mit sehr niedriger rel. Luftfeuchte gelagert, kommt es an den Lamellenoberflächen zu einem weiteren Abtrocknen, soweit diese der Luft frei zugänglich sind. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel einer Holzfeuchteänderung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Zeit aus eigenen Messungen. Da der 1K-PUR Klebstoff nur etwa 0,3–0,55 mm in das Holz eindringt (Niemi et al. 2004), kann im Extremfall Wasser für die Aushärtung fehlen. Der Feuchtetransport aus dem Brettinneren erfolgt im unteren Feuchtebereich überwiegend durch Diffusion und ist extrem langwierig und komplex. Dieses gebundene Wasser steht daher für die Aushärtung des Klebstoffes nur bedingt bereit. Einige Sortimenten werden auch gezielt mit sehr geringer Holzfeuchte verklebt. Dazu zählen z.B. schichtweise aufgebautes Fertigparkett oder im Innenbereich eingesetzte Massivholzplatten. Auch bei thermisch vergütetem Holz sind unter vergleichbaren Klimabedingungen durch die reduzierte Gleichgewichtsfeuchte deutlich geringere Holzfeuchten vorhanden als bei unvergütetem Holz. So beträgt die Gleichgewichtsfeuchte von thermisch behandelter *Pinus radiata* bei 20 °C/65% rel. Luftfeuchte nur noch 7%–8% anstelle von 12%–13% bei unbehandeltem Holz. Um eine fehlerfreie Verklebung unter solchen Extrembedingungen zu gewährleisten, sind also die Randbedingungen unbedingt einzuhalten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Wechselwirkung zwischen Holzfeuchte, relativer Luftfeuchte und ausgewählten technologischen Parametern untersucht.

2 Erkenntnisstand

Entscheidend für das Aushärten des Klebstoffes ist bei 1K-PUR Klebstoffen die Holzfeuchte im Randbereich. Der Klebstoff selbst dringt nur wenig in das Holz ein. Niemi et al. (2004)

ermittelten eine Eindringtiefe von lediglich einigen zehntel Millimetern. Die Eindringtiefe war bei 1K-PUR geringer als bei Harnstoffharz oder PVAC.

Untersuchungen von Schirle et al. (2002) haben aufgezeigt, dass auch die Eindringtiefen in Früh- und Spätholz variieren. Die Eindringtiefe im Frühholz ist doppelt so groß wie im Spätholz. Aus dieser Erkenntnis wurde für die vorliegende Arbeit abgeleitet, dass im Abbindeprozess nur die Oberflächenfeuchte massgebend ist und die im Herstellungsprozess kontrollierte mittlere Holzfeuchte einen untergeordneten Einfluss auf die Qualitätskontrolle für die Verarbeitung von 1K-PUR Klebstoff hat. Das Eindringverhalten des Klebstoffes wird zusätzlich auch von der Holzfeuchte, der Oberflächengüte, der Klebstoffauftragsart (ein- oder beidseitig), der Auftragsmenge und der Klebstoffviskosität beeinflusst.

Radovic und Goth beschrieben bereits 1994 den Einfluss des Raumklimas auf die Abbindegeschwindigkeit von 1K-PUR Klebstoffen. In den Klimata 20/65 und 15/90 (erste Zahl steht für Temperatur (°C), zweite Zahl für relative Luftfeuchte (%)) wurde in den ersten 16 Stunden ein beinahe identischer Anstieg der Bindefestigkeit beobachtet, während in der Folge die Festigkeit im Klima 20/65 weiter stieg und jene im Klima 15/90 wieder deutlich absank. Im Klima 30/40 lagen die Festigkeiten zwischen den beiden anderen Klimaten.

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit von 1K-PUR Klebstoffen wurden von Vick und Okkonen (2000) Versuche mit einem HMR-Haftvermittler (Primer) durchgeführt. Insbesondere bei der Prüfung der Klebstoffugen nach der Nasslagerung wurden mit Haftvermittlern deutlich höhere Klebfestigkeiten erreicht.

Im Abbindeprozess von 1K-PUR-Klebstoffen reagieren reaktive Isocyanatgruppen (NCO) mit Hydroxylgruppen (OH), überwiegend des Wassers. Die Reaktionspartnerwahl lässt sich mit den kinetischen Potentialen bzw. ihren Anziehungskräften erklären. Eine freie NCO-Gruppe reagiert mit Wasser, sofern dieses leicht zugänglich ist. Wenn das nicht der Fall ist, kann sich eine Bindung zu OH-Gruppen der Holzsubstanz bilden, speziell wenn der Vorgang thermisch beschleunigt wird. Pizzi und Owens (1995) ermittelten, dass bei Duromeren eine kovalente Bindung

zwischen Isocyanaten und Zellulose entsteht, sofern sehr hohe Temperaturen (128–180 °C) herrschen und kein Wasser für die Reaktion vorhanden ist. Kovalente Verbindungen sind daher im üblichen Einsatzgebiet von 1K-PUR Klebstoffen ausgeschlossen.

Die Euronorm DIN EN 386 (2002) definiert die Rahmenbedingungen im Herstellungsprozess von Brettchichtholz; diese sind allerdings für den Einsatz von Polykondensationsleimen ausgelegt. Für den Einsatz von 1K-PUR Klebstoff sind seitens der Klebstoffhersteller Bestrebungen im Gange, die Prüf- und Zulassungsnormen auf sogenannte, 'neue' Klebstoffe auszudehnen. Bisher gelten folgende Definitionen:

- Die Temperatur in den Herstellungsräumen muss mindestens 15 °C betragen. Während der Aushärtung der Bauteile ist eine Temperatur von 20 °C erforderlich.
- Die rel. Luftfeuchte in den Herstellungsräumen muss mindestens 40% bis 75% betragen, beim anschließenden Aushärten sind 30% zulässig.
- Die Holzfeuchte der Lamelle muss zwischen 8% und 15% betragen. Der Feuchteunterschied zwischen den zu verklebenden Lamellen darf $\pm 2\%$ nicht übersteigen.
- Wenn vorgetrocknetes Holz verwendet wird, müssen Lagermöglichkeiten vorhanden sein, um die erforderliche Holzfeuchte zu gewährleisten.
- Als Pressdruck wird für Nadelholz bei Lamellendicken ≤ 35 mm $0,6 \text{ N/mm}^2$ und für Dicken zwischen 35 und 45 mm $1,0 \text{ N/mm}^2$ empfohlen.

Rahmenbedingungen einzugrenzen, wurden zunächst Vorversuche durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die Versuchsübersicht.

3.1 Versuchsmaterial

Für die Verklebungen wurde Fichtenholz (*Picea abies* Karst.) verwendet. Als Klebstoffe wurden drei 1K-PUR Klebstoffe mit stark variierender Reaktivität der Fa. Purbond AG, Sempach/Schweiz eingesetzt. Tabelle 1 zeigt die technologischen Parameter der Klebstoffe gemäß Herstellerangaben. Die offene Zeit fällt in der aufgeführten Reihenfolge von A nach C stark ab. KLEBSTOFF A reagiert am langsamsten (längste offene Zeit), KLEBSTOFF C am schnellsten (kürzeste offene Zeit).

Die Prüfung erfolgte an Zugscherproben nach DIN EN 302-1 (2001) (Abb. 3). Durch die Wahl des Holzes sollten die im Ingenieurholzbau typischen Bedingungen simuliert werden.

3.2 Versuchsplan der Vorversuche

Durch die Vorversuche wurden die Rahmenbedingungen der Hauptversuche eingegrenzt. Variiert wurden:

- Die Holzfeuchte
- Die zusätzlich auf die Oberfläche aufgesprühte Wassermenge
- Die offene Wartezeit
- Die Presszeit

Bei den Vorversuchen wurde nach der Verklebung mit einem Stechbeitel die Festigkeit mittels Aufspalten getestet.

3.3 Versuchsplan der Hauptversuche

Aufbauend auf den in den Vorversuchen abgestimmten Rahmenbedingungen erfolgte im Hauptversuch eine statistische Versuchsplanung, um die Wechselwirkung der untersuchten Parameter erfassen zu können. Es wurde ein Versuchsplan nach Box-

3 Versuchsmaterial und Methodik

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung bestand darin, das Verhalten von 3 verschiedenen 1K-PUR Klebstoffen mit sich deutlich unterscheidender Reaktivität bei variabler Feuchte im unteren, technisch möglichen Holzfeuchtebereich zu prüfen. Um die

Abb. 2 Versuchsübersicht
Fig. 2 Experimental scheme

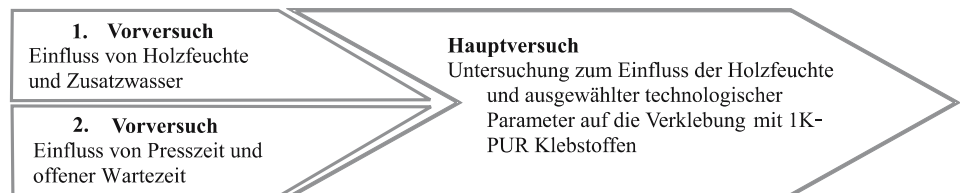


Tabelle 1 Spezifische Eigenschaften der eingesetzten PURBOND® 1K-PUR Klebstoffe

Table 1 Specific characteristics of the used PURBOND® one-part PUR adhesives

Eigenschaft	Einheit	KLEBSTOFF		
		A	B	C
Viskosität	[mPa · s]	≈ 16 000	≈ 3500	≈ 15 000
Dichte	[kg/m ³]	≈ 1250	≈ 1100	≈ 1150
Feststoffgehalt	[%]	100	100	100
Holzfeuchte für Verklebung	[%]	≥ 8	≥ 8	≥ 8
Klebstoffauftrag	[g/m ²]	≥ 180 einseitig	≥ 200 einseitig	≥ 200 einseitig
Offene Wartezeit	[Min.]	≤ 120	≤ 60	≤ 5
Mindestpresszeit ¹	[Min.]	≥ 390	≥ 180	≥ 20
Pressdruck	[N/mm ²]	0,6–0,8	0,6–0,8	0,6–0,8
Endfestigkeit	[h]	≥ 48	≥ 24	≥ 12

¹Mindestpresszeit bei 12% Holzfeuchte und 65% rel. Luftfeuchte

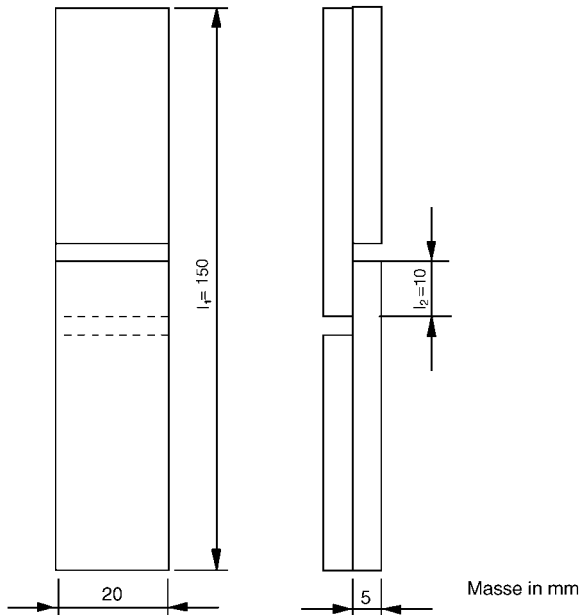


Abb. 3 Abmessungen der Prüfkörper gemäß DIN EN 302-1 (2001)
Fig. 3 Dimensions of the specimens according to DIN EN 302-1 (2001)

Behnken (Petersen 1991) mit 4 Variablen und je 3 Faktorstufen verwendet. Tabelle 2 enthält die Variablen und wichtigen Konstanten des Versuchsplanes, Tabelle 3 den vollständigen Versuchsplan mit Faktorstufen. Je Variante wurden 10 Proben hergestellt und geprüft.

Die Kombination von drei Klebstofftypen zu je 4 Einflussfaktoren (x_1, x_2, x_3, x_4) und deren je 3 Faktorstufen ergäben bei Anwendung eines klassischen Versuchsplanes $3 \times 3^4 = 243$ Versuchspunkte. Da aufgrund der Materialstreuung stets Wiederholungsversuche durchgeführt werden müssen, wären bei 10 Proben je Variante insgesamt 2430 Proben herzustellen und zu untersuchen. Unter Anwendung der statistisch optimierten Versuchsplanung wurde eine Reduzierung des Versuchsumfanges auf 810 Proben erreicht. Zusätzlich war es dadurch auch möglich, die Wechselwirkungen der einzelnen Einflussgrößen zu untersuchen.

Die Regressionsanalyse wurde mit Hilfe der Mathematik-Software SAS durchgeführt. Der Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen x_i ($i = 1, \dots, 4$) und der Zielgröße y wurde mit Hilfe eines multiplen Modellansatzes aus linearen, quadratischen und gemischt-quadratischen Gliedern berechnet. In den ange-

Tabelle 3 Versuchsplan nach Box-Behnken mit Faktorstufen

Table 3 Experimental plan according to the Box-Behnken design including factor levels

Vers. Nr.	Holzfeuchte [%]	Zusatzwasser [g/m ²]	Offene Wartezeit [%]	Relative Luftfeuchte [%]
1	7,0	50	50	65
2	7,0	0	50	65
3	4,0	50	50	65
4	4,0	0	50	65
5	5,5	25	100	95
6	5,5	25	100	35
7	5,5	25	0	95
8	5,5	25	0	35
9	5,5	25	50	65
10	7,0	25	50	95
11	7,0	25	50	35
12	4,0	25	50	95
13	4,0	25	50	35
14	5,5	50	100	65
15	5,5	50	0	65
16	5,5	0	100	65
17	5,5	0	0	65
18	5,5	25	50	65
19	7,0	25	100	65
20	7,0	25	0	65
21	4,0	25	100	65
22	4,0	25	0	65
23	5,5	50	50	95
24	5,5	50	50	35
25	5,5	0	50	95
26	5,5	0	50	35
27	5,5	25	50	65

gebenen Regressionsgleichungen wurden nur die Einflussfaktoren x_i ($x_1 =$ Holzfeuchte, $x_2 =$ Zusatzwassermenge, $x_3 =$ offene Wartezeit, $x_4 =$ rel. Luftfeuchte) sowie deren gemischt-quadratische und quadratische Glieder berücksichtigt, deren statistische Sicherheit mindestens 95% beträgt.

3.4 Versuchsdurchführung

Die Proben wurden zunächst mit einem Dickenübermaß von 2 mm zugeschnitten und bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte klimatisiert. Höchstens 24 h vor der Verklebung wurden sie auf die endgültige Dicke gehobelt. Der Klebstoffauftrag erfolgte nach Herstellerangaben einseitig mittels Aluzahnspachtel von Purbond. Die Auftragsmenge wurde durch Wiegen des Klebstoffes kontrolliert. Das Klima für den Klebstoffauftrag und

Tabelle 2 Faktorstufen für variierende sowie konstante Parameter
Table 2 Factor levels for varying and steady influencing factors

Pos.	Einflussgröße	Faktorstufen für KLEBSTOFF A / B / C			Einheit
		-1 (min)	0	+1 (max)	
1	Holzfeuchte	4	5,5	7	[%]
2	Zusatzwasser	0	25	50	[g/m ²]
3	Relative Luftfeuchte	35	65	95	[%]
4	Offene Wartezeit	0/0/0	60/30/2,5	120/60/5	[Min.]
5	Klebstoffauftragsmenge		konstant 180		[g/m ²]
6	Presszeit		konstant 390 (A)/180 (B)/20 (C)		[Min.]
7	Pressdruck		konstant 0,6		[N/mm ²]

die Verklebung betrug bei den Vorversuchen 20/25 für den Einfluss von Holzfeuchte und Zusatzwasser sowie 20/65 für den Einfluss von offener Wartezeit und Presszeit. Bei den Hauptversuchen erfolgte die Verklebung jeweils in einem klimatisierten Raum mit dem Sollklima gemäss Versuchsplan. Für diese Versuche wurde eine mobile Presse gebaut und eingesetzt.

Das Zusatzwasser wurde mittels Sprühflasche von Hand aufgebracht und die aufgebrauchte Wassermenge mittels Wiegen kontrolliert.

Nach dem Pressen wurden die verklebten Teile erneut mindestens sieben Tage im Klima 20/65 konditioniert. In Anlehnung an die DIN EN 302-1 (2001) wurden Proben zur Ermittlung der Zugscherfestigkeit zugeschnitten und gemäß der Lagerfolge A1 für sieben Tage im Klima 20/65 gelagert, bevor sie an der Universalprüfmaschine geprüft wurden.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Ergebnisse der Vorversuche

Die Ergebnisse unter Variation der Holzfeuchte und der zusätzlich applizierten Wassermenge sind in Tabelle 4 enthalten. KLEBSTOFF A (der am wenigsten reaktive Klebstoff) erzielte ohne Zusatzwasser bei den gewählten, extrem niedrigen Holzfeuchten keine Haftung. Ab 50 g/m² Wassermenge erfolgte eine

als visuell einwandfrei beurteilte Verklebung. KLEBSTOFF B lieferte im Holzfeuchtebereich unterhalb 5% ähnliche Ergebnisse, wobei bereits mit 20 g/m² Zusatzwasser eine gute Haftung erfolgte. KLEBSTOFF C als der reaktivste Klebstoff, verklebte auch unter der extrem niedrigen Holzfeuchte durchwegs einwandfrei.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse unter Variation der offenen Wartezeit sowie der Presszeit. Für KLEBSTOFF A konnte unterhalb 5% Holzfeuchte und ohne offene Wartezeit, trotz Verdreifachung der Presszeit keine Haftung erzielt werden. Die Proben zeigten nur in den Randbereichen abgedundenen Klebstoff, der vermutlich mit Luftfeuchtigkeit reagieren konnte. Eine lange offene Wartezeit wirkt sich positiv auf die Verklebung aus. Offensichtlich reagiert der Klebstoff mit der Luftfeuchte der Umgebung. Dieser 1K-PUR Klebstoff schäumte nur geringfügig auf. Im Bereich von 6% Holzfeuchte wurde ab einer dreifachen Sollpresszeit eine gute Haftung erzielt. KLEBSTOFF B schäumte deutlich mehr (da reaktiver) als KLEBSTOFF A, erzielte aber auch beim Überschreiten der vorgeschriebenen offenen Wartezeit gute Verklebungen.

Durch die Voruntersuchungen konnte kein Parameterspektrum soweit eingegrenzt werden, dass für alle drei geprüften Klebstoffe in dem der Zielstellung der Arbeit zugrundeliegenden Feuchtebereich unter allen Randbedingungen eine ausreichende Verklebung erfolgt. Dies hatte zur Folge, dass bei den Hauptversuchen mit KLEBSTOFF A Nullwerte (keine ausreichende

Tabelle 4 Beurteilung der Verklebungen bei Variation der Holzfeuchte und der Zusatzwassermenge

Table 4 Evaluation of adhesion bonding allowing for varying wood moisture content and additional water amount

Klebstoff	KLEBSTOFF A				KLEBSTOFF B				KLEBSTOFF C	
Presszeit	6,5 h (100%)				3 h (100%)				20 Min. (100%)	
Holzfeuchte [%]	3,6 ... 4,7	4,4 ... 4,8	7,2 ... 8,1	3,6 ... 4,7	4,4 ... 4,8	7,2 ... 8,1	3,6 ... 4,7	4,4 ... 4,8	7,2 ... 8,1	
Wassermenge [g/m ²]										
0	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	
5	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	geeignet	geeignet	–	geeignet	
20	ungeeignet	ungeeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	
50	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	–	geeignet	
100	geeignet	geeignet	–	geeignet	geeignet	–	–	–	–	

Tabelle 5 Beurteilung der Verklebungen bei Variation der Presszeit und der offenen Wartezeit

Table 5 Evaluation of adhesion bonding allowing for varying pressing time and open waiting time

Klebstoff	KLEBSTOFF A				KLEBSTOFF B				
Holzfeuchte [%]	4,5 ... 4,7				5,8 ... 6,2			5,8 ... 6,2	
Presszeit	100%	200%	300%	100%	200%	300%	100%	200%	300%
Offene Wartezeit [%]									
0	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet
50	–	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	ungeeignet	–	–	geeignet	–
100	–	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	–	–	geeignet	–
150	–	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet	–	–	geeignet	–

Verklebung) auftraten. Da aber ein vergleichender Test aller drei Klebstoffe erfolgen sollte, wurde dies in Kauf genommen. Dies bedingte einige Probleme bei der Regressionsrechnung.

4.2 Ergebnisse der Hauptversuche

Tabelle 6 zeigt die berechneten Regressionsgleichungen für die drei Klebstoffe, wobei nur die signifikanten Parameter berücksichtigt wurden. Folgende Glieder des Regressionsansatzes erwiesen sich als signifikant:

- KLEBSTOFF A: Alle 4 untersuchten Einflussgrößen (Holzfeuchte, Zusatzwassermenge, offene Wartezeit und rel. Luftfeuchte)
- KLEBSTOFF B: Zusatzwassermenge und offene Wartezeit
- KLEBSTOFF C: Zusatzwassermenge, offene Wartezeit und rel. Luftfeuchte

Die 3 Klebstoffe mit variabler Reaktivität stellen unterschiedliche Ansprüche an den Feuchtehaushalt im Verarbeitungsprozess. Entscheidend für die Verklebungsgüte ist die Wechselwirkung der untersuchten Parameter.

Holzfeuchte. Die Scherfestigkeit steigt bei zunehmender Holzfeuchte vor der Verklebung im untersuchten Bereich an, dies gilt für alle Klebstoffe (Abb. 4). Bei Klebstoff A wurde ohne Zusatzwasser im untersuchten Holzfeuchtebereich, unter Einhal-

tung der Mindestpresszeit¹, keine oder nur eine geringe Haftung erzielt. Die überwiegende Anzahl der Proben delaminierte direkt nach dem Öffnen der Presse. Die Holzoberflächen wiesen vorwiegend dickflüssigen, nicht ausgehärteten Klebstoff auf. Daher müssten die Untersuchungen für diesen Klebstoff gesondert unter angepassten Feuchtebereichen erneut durchgeführt werden. Die Scherfestigkeit von KLEBSTOFF B und KLEBSTOFF C steigt mit zunehmender Holzfeuchte, wobei die Werte bei KLEBSTOFF B um rund 2,5 N/mm² tiefer liegen.

Zusatzwasser. Das Aufsprühen von Zusatzwasser (unbehandeltes Leitungswasser) bewirkt nicht bei allen Klebstoffen eine höhere Leitungsfestigkeit (Abb. 5). Bei KLEBSTOFF A ist im untersuchten Holzfeuchtebereich das Aufbringen von Zusatzwasser notwendig. Um die Mindestfestigkeit von 6 N/mm² (DIN EN 386 2002) zu erreichen, mussten etwa 40 g/m² Wasser appliziert werden. Bei KLEBSTOFF B bewirkt Zusatzwasser bis zu 25 g/m² eine geringfügig erhöhte Scherfestigkeit, darüber bleibt sie weitgehend konstant. KLEBSTOFF C verzeichnet bereits ohne Zusatzwasser hohe Festigkeiten. Beim Auftrag von Zusatzwasser ergab sich kein Festigkeitsanstieg, die Festigkeit fiel tendenziell leicht ab.

¹ Purbond verlangt in den Datenblättern das Erhöhen der Presszeit, sofern die Holzfeuchte unterhalb 12% und die rel. Luftfeuchte unterhalb 65% liegt.

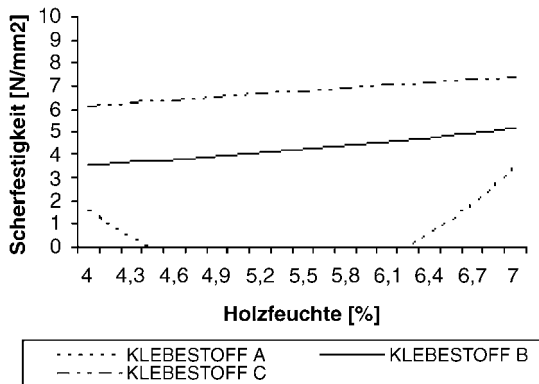


Abb. 4 Scherfestigkeit der KLEBSTOFFE A, B und C in Abhängigkeit von der Holzfeuchte. Für die jeweils nicht variierenden Einflussgrößen wurden folgende Werte in die Regressionsgleichung eingesetzt: Kein Zusatzwasser, offene Wartezeit A: 60 Min., B: 30 Min., C: 0 Min., rel. Luftfeuchte 65%
Fig. 4 Shear strength of the adhesives A, B and C depending on the wood moisture content. For non-variable influencing factors the following values were used in the regression analysis: No additional water, open waiting time A: 60 min, B: 30 min, C: 0 min, relative humidity 65%

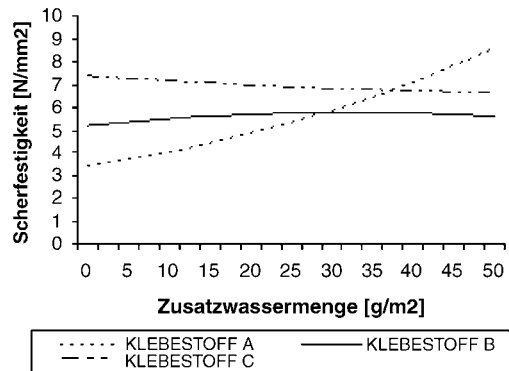


Abb. 5 Scherfestigkeit der KLEBSTOFFE A, B und C in Abhängigkeit von der Zusatzwassermenge. Für die jeweils nicht variierenden Einflussgrößen wurden folgende Werte in die Regressionsgleichung eingesetzt: Holzfeuchte 7%, offene Wartezeit A: 60 Min., B: 30 Min., C: 0 Min., rel. Luftfeuchte 65%
Fig. 5 Shear strength of the adhesives A, B and C depending on the additional water. For non-variable influencing factors the following values were used in the regression analysis: Wood moisture content 7%, open waiting time A: 60 min, B: 30 min, C: 0 min, relative humidity 65%

Tabelle 6 Berechnete Regressionsgleichungen für alle untersuchten Klebstoffe (statistische Sicherheit der berücksichtigten Versuchsparameter mindestens 95%)
Table 6 Calculated regression equation for all tested adhesives (observed significance level 95%)

Klebstoff	Regressionsgleichung für die Scherfestigkeit y
KLEBSTOFF A	$y = +2,93x_2 + 4,05x_1^2 + 2,13x_3^2 + 1,86x_4^2 - 2,11x_3x_4$
KLEBSTOFF B	$y = +0,84x_2 - 0,94x_3 - 1,49x_2x_3$
KLEBSTOFF C	$y = -0,88x_3 - 0,89x_2x_4$

Einflussgrößen: (x₁ = Holzfeuchte; x₂ = Zusatzwassermenge; x₃ = offene Wartezeit; x₄ = rel. Luftfeuchte)

Offene Wartezeit. KLEBSTOFF B erzielt mit steigender offener Wartezeit eine höhere Festigkeit, sofern kein Wasser aufgesprüht wird (Abb. 6). Bei KLEBSTOFF C sinkt die Festigkeit mit Erhöhung der Wartezeit im oberen Bereich leicht ab. Bei KLEBSTOFF A kommt es zu einer minimalen Scherfestigkeit im mittleren Bereich der untersuchten Wartezeit. Dies kann u.a. auf den gewählten mathematischen Ansatz zurückgeführt werden und sollte mit einem variierten Versuchsbereich überprüft werden.

Zusatzwasser beschleunigt den chemischen Prozess und verkürzt somit die offene Zeit der 1K-PUR Klebstoffe. Dabei muss die technische offene Zeit gemäß Herstellerangaben nicht zwingend beeinträchtigt werden. Sobald bei KLEBSTOFF A Wasser aufgesprüht wird, hat die offene Wartezeit einen untergeordneten Einfluss auf die Festigkeit. KLEBSTOFF A sollte im untersuchten Holzfeuchtebereich immer mit Zusatzwasser besprüht werden, die offene Zeit von zwei Stunden wird dadurch nicht verkürzt.

Relative Luftfeuchte. Abbildung 7 zeigt die Versuchsergebnisse. Bei KLEBSTOFF C, dem Klebstoff mit der kürzesten offenen Zeit, wirkt sich ohne Zusatzwasser die relative Luftfeuchte am stärksten aus. Mit zunehmender rel. Luftfeuchte steigt die Festigkeit deutlich. Der Klebstoff nimmt offensichtlich Wasser aus der Luft auf. Für KLEBSTOFF B sinkt die Scherfestigkeit tendenziell leicht ab. Bei KLEBSTOFF A kommt es nach einem leichten Abfall auch zum Anstieg der Scherfestigkeit bei erhöhter rel. Luftfeuchte. Diese Ergebnisse stehen teilweise in gewissem Widerspruch zu denen bei Variation der Holzfeuchte, der Zusatzwassermenge und auch der offenen Zeit. So ist der Einfluss der offenen Zeit und der rel. Luftfeuchte beim Klebstoff B gegenläufig. Hierzu sollten weitergehende Arbeiten durchgeführt werden, um die Ursachen abzuklären. Versuche unter ausschließlicher Variation der rel. Luftfeuchte sind ebenso sinnvoll wie eine Messung der Kinetik des Aushärtvorganges.

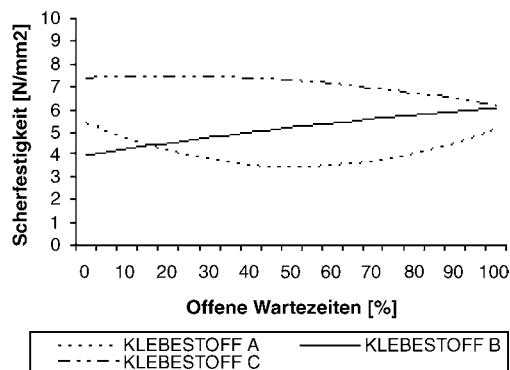


Abb. 6 Scherfestigkeit der KLEBSTOFFE A, B und C in Abhängigkeit von der offenen Wartezeit. Für die jeweils nicht variierenden Einflussgrößen wurden folgende Werte in die Regressionsgleichung eingesetzt: Kein Zusatzwasser, Holzfeuchte 7%, relative Luftfeuchte 65%

Fig. 6 Shear strength of the adhesives A, B and C depending on the open waiting time. For non-variable influencing factors the following values were used in the regression analysis: No additional water, wood moisture content 7%, relative humidity 65%

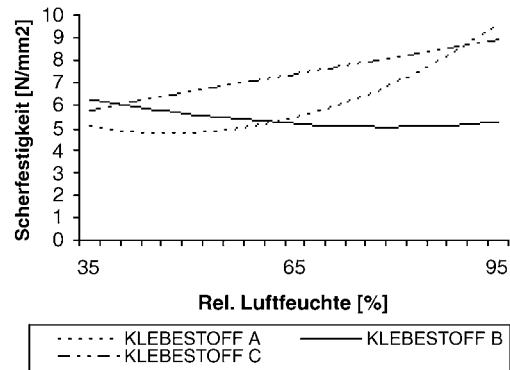


Abb. 7 Scherfestigkeit der KLEBSTOFFE A, B und C in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchte. Für die jeweils nicht variierenden Einflussgrößen wurden folgende Werte in die Regressionsgleichung eingesetzt: Kein Zusatzwasser, Holzfeuchte 7%, offene Wartezeit A: 60 Min., B: 30 Min., C: 0 Min.

Fig. 7 Shear strength of the adhesives A, B and C depending on the relative humidity. For non-variable influencing factors the following values were used in the regression analysis: No additional water, wood moisture content 7%, open waiting time A: 60 min, B: 30 min, C: 0 min

Die relative Luftfeuchte spielt nicht nur als direkter Einflussfaktor auf das Abbinden von 1K-PUR Klebstoffen eine wichtige Rolle. Da es bei niedriger Luftfeuchte zum Abtrocknen des Holzes an der Oberfläche kommt, kann sich unter Umständen ein für die Verklebung ungünstiges Feuchteniveau in der Randzone der Lamellen einstellen. Im Herstellungsprozess ist daher unbedingt auf eine rel. Luftfeuchte von $\pm 65\%$ zu achten, dies entspricht einer Ausgleichsfeuchte von Fichte von ca. 12%. Eine geringere Luftfeuchte erhöht das Risiko von Fehlverklebungen.

5 Schlussfolgerungen

Die Holzfeuchte und auch die relative Luftfeuchte spielen eine zentrale Rolle bei der Verklebung von 1K-PUR Klebstoffen, da diese Wasser zum Aushärten benötigen. Daher ist sowohl eine dem Klebstoff angepasste, mittlere Holzfeuchte vor der Verklebung als auch eine entsprechende relative Luftfeuchte bei der Verklebung erforderlich. Insbesondere im Winter kommt es in nicht klimatisierten Hallen teilweise zu extrem niedrigen relativen Luftfeuchten von bis zu $< 30\%$. Dadurch trocknen die zu verklebenden Lamellen bei entsprechend langer Liegedauer an der Oberfläche stark ab. Verbunden mit einer geringen Eindringtiefe des Klebstoffes kann es dazu kommen, dass dem Klebstoff für den Abbindeprozess nicht genügend Wasser zur Verfügung steht. Daher sind sowohl Holzfeuchte als auch Raumklima bei der Produktion zu kontrollieren, um Fehlverklebungen zu verhindern. Erforderlichenfalls sind entsprechende Vorkehrungen (z.B. Luftbefeuchtung) zu treffen.

Im Rahmen der Arbeit wurden drei 1K-PUR Klebstoffe mit deutlich abgestufter Reaktivität geprüft. Variiert wurden die Holzfeuchte im Bereich von 4 bis 7%, die rel. Luftfeuchte (35% bis 95%), die auf die Holzoberfläche aufgebraachte Zusatzwassermenge (0 bis 50 g/m²) und die offene Wartezeit (0 bis 100% der

Nennwerte). Klebstoffauftragsmenge, Presszeit und Pressdruck entsprachen den Verarbeitungsrichtlinien.

Die drei Klebstoffe unterschieden sich dabei wesentlich. Es zeigte sich, dass die Holzfeuchte und die relative Luftfeuchte insbesondere bei dem getesteten langsam reagierenden KLEBSTOFF A einen wesentlichen Einfluss auf die Verklebungsgüte haben. Zu geringe Holz- und rel. Luftfeuchte führten zu Fehlverklebungen. Durch Aufsprühen von Oberflächenwasser auf das Holz konnte nur beim Klebstoff mit langer offener Zeit (KLEBSTOFF A) eine Verbesserung der Klebfugenfestigkeit erreicht werden. Es zeigte sich, dass eine Trocknung des Holzes mit einer geringen Streuung der Holzfeuchte sowie eine Überwachung des Raumklimas, insbesondere der relativen Luftfeuchte erforderlich ist. Arbeitet man mit niedrigen mittleren Holzfeuchten (z.B. $7 \pm 2\%$ bei Fertigparkett), wie es beispielsweise bei der Verklebung von Parkett oder auch bei im Innenausbau eingesetzten Massivholzplatten (um spätere Rissbildungen zu vermeiden) erfolgt, sollten entsprechende Vorkehrungen getroffen werden.

Wichtig ist somit die Kontrolle und Steuerung der Hallentemperatur, der relativen Luftfeuchte, die Messung der Oberflächenfeuchte der Lamellen (z.B. mit im Nahinfrarot arbeitenden Feuchtemessgeräten, wie sie in der Holzwerkstoffindustrie eingesetzt werden) und der daraus gegebenenfalls aufgebaute, optimale Wasserauftrag auf die Fügeiteiloberfläche.

Die vorliegenden Untersuchungen sollten unter Einbeziehung einer breiteren Palette an Klebstoffen verschiedener Her-

steller wiederholt werden. Es ist zu erwarten, dass sich die Struktur des Klebstoffes deutlich auswirkt.

Literatur

- DIN prEN 302-1(2001) Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit. Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 386 (2002) Brettschichtholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung. Beuth Verlag, Berlin
- Niemz P (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW, Leinfelden-Echterdingen
- Niemz P, Mannes D, Lehmann E, Vontobel P, Haase S (2004) Untersuchung zur Verteilung des Klebstoffes im Bereich der Leimfuge mittels Neutronenradiographie und Mikroskopie. Holz Roh- Werkst 62:424–432
- Petersen H (1991) Grundlagen der statistischen Versuchsplanung, Band 2. Ecomed, Frankenthal
- Pizzi A, Owens NA (1995) Interface Covalent Bonding Vs. Wood-Induced Catalytic Autocondensation of Diisocyanate Wood Adhesives. Holzforschung 49:269–272
- Radovic B, Goth H (1994) Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffe für die Herstellung von tragenden Holzbauteilen. Bauen Holz 1:22–33
- Sauer A (2002) Erfassung und Auswertung von Verklebungsproblemen in der Anwendung. Aus: Charakterisierung und Optimierung der Holzverklebung mit 1 Komponenten Polyurethan (1K:PUR) Klebstoffen. KTI Abschlussbericht 4126.1, EMPA, Abteilung Holz, Dübendorf (Teilabschnitt im Bericht (Schirle et al. 2002))
- Schirle MA, Künniger T, Fischer A, Richter K (2002) Charakterisierung und Optimierung der Holzverklebung mit 1 Komponenten Polyurethan (1K:PUR) Klebstoffen. KTI Abschlussbericht 4126.1, EMPA, Abteilung Holz, Dübendorf
- Vick CB, Okkonen EA (2000) Durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling. Forest Prod J 50(10):69–75