

Verklebung von Laubhölzern

Falk K. Wittel
Peter Niemz
Hans Jürgen Herrmann

Philipp Hass
Doktorat D-BAUG
Miller Mendoza Jimenez
Doktorat D-PHYS

Institut für Baustoffe IfB
ETH Zürich

fwittel@ethz.ch

Kleberverbindungen sind von grundlegender Bedeutung für die Herstellung moderner Holzbauprodukte. Obwohl Kleberverbindungen technologisch und wirtschaftlich bedeutend sind, gründet sich unser Wissen über die Ausbildung von Klebfugen und das Versagen von Verklebungen überwiegend auf Erfahrungswerte. Um die entsprechenden Prozesse zu beschreiben, sind detaillierte Kenntnisse der Holzanatomie, der härtenden Klebstoffe sowie ihrem Eindringverhalten in die Holzstruktur erforderlich. Am Beispiel von Buchenholz wird skizziert, wie Klebfugen entstehen, sie sinnvoll charakterisiert sind und sich letztlich ihre Strukturen vorhersagen lassen.

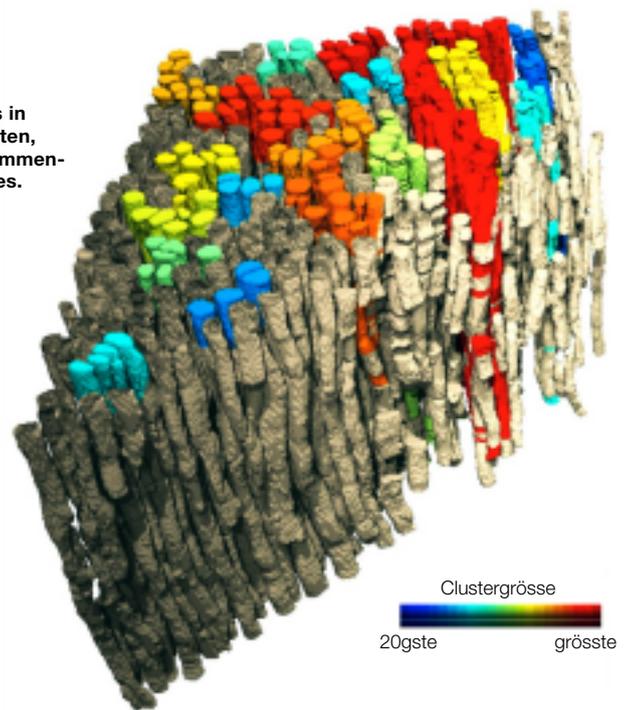
Die Güte von Verklebungen hängt stark davon ab, wie der Klebstoff innerhalb der Holzteile verteilt ist. Bei Laubholz ist im Gegensatz zu Nadelholz das zugängliche Volumen meist grösser als die aufgetragene Klebstoffmenge. Prinzipiell kann also die gesamte aufgetragene Klebstoffmenge in die von der Klebfläche zugänglichen Hohlräume des Holzes eindringen. Der Klebstoff wird durch Kapillarkräfte vom Holz «aufgesaugt», das heisst, es entsteht kein durchgängiger Klebstofffilm zwischen den Füge-teilen. Klebstoffe werden auf ihrem Weg ins Holz dickflüssiger, weil sie aushärten und/oder Lösungsmittel in die Zellwände diffundieren. Dies erschwert den Transport in das poröse Holz. Um diese Vorgänge zu beschreiben,

sind genaue Kenntnisse des anatomischen Aufbaus des Porenraums sowie des Härungsverhaltens der verwendeten Klebstoffe notwendig.

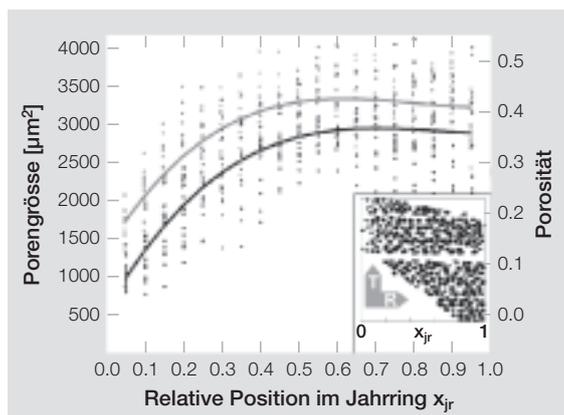
Das Gefässnetzwerk von Buchenholz

Bei Buche ist der Flüssigkeitstransport stark von dem ringeigenen Gefässnetzwerk dominiert. Dieses besteht aus Bündeln von schlauchartigen Gefässen, die bis zu 2 m lang werden können und um ausgeprägte, radial orientierte Holzstrahlen herumgeführt sind. An Kontaktstellen von Gefässen ist durch spezielle Poren (Tüpfel) ein Flüssigkeitstransport zwischen den Gefässen möglich. Über diese Verbindungsstellen entsteht ein grosses Netzwerk, das prinzipiell alle Ge-

Ausschnitt des Gefässnetzwerks in einem Jahrring mit den 20 grössten, im Betrachtungsausschnitt zusammenhängenden Teilen des Netzwerkes.



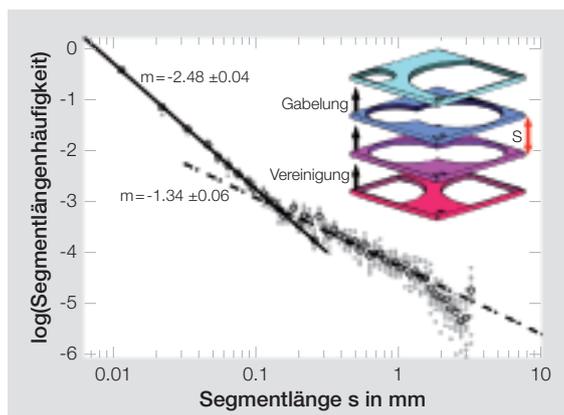
Clustergrösse
20gste grösste



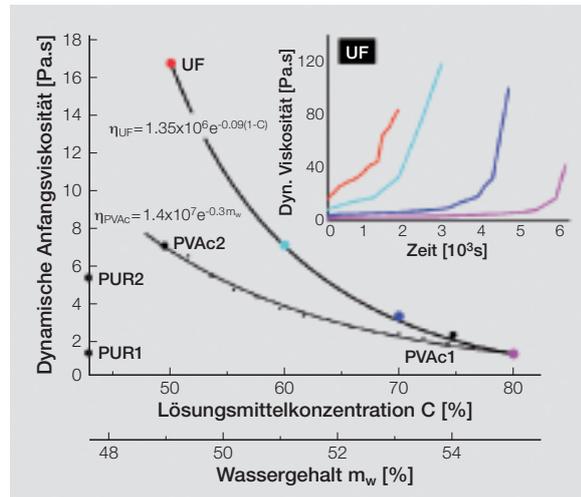
Gefässgrössen und Porosität über Jahrringe unterschiedlicher Breite. Der Bildausschnitt zeigt einen Hirnschnitt mit identifizierten Gefässen. $x_{jr} = 0$ entspricht Spätholz und $x_{jr} = 1$ Frühholz.

fässe eines Jahrrings umfasst. Entscheidend für den kapillaren Transport von Flüssigkeiten ist der mittlere Durchmesser der Gefässe sowie deren Anzahl.

Aus diesen beiden Grössen ergibt sich die Porosität des Gefässnetzwerks. Skaliert mit der Jahrringbreite, ergeben Messungen an unterschiedlich breiten Jahrringen sehr ähnliche Porositätsverläufe. Um die Durchlässigkeit (Permeabilität) des von den Gefässen gebildeten Porenraums zu ermitteln, muss die Topologie des Netzwerkes bekannt sein. Dreidimensionale tomographische (m-CT) Bilder ermöglichen es, das Gefässsystem zu isolieren und so Verbindungsstellen der einzelnen Gefässe zu identifizieren. Über eine stufenweise Projektion aller Poren auf die jeweils benachbarten Bildebenen werden Vereinigungen (Ebene 1 → 2) und Gabelungen (Ebene 3 → 4) von Gefässen gefunden. Die Entfernung zwischen zwei Verbindungen entlang eines Gefässes wird als Segmentlänge bezeichnet. Deren Längenverteilung ist eine typische Eigenschaft von Netzwerken und weist insbesondere bei den untersuchten Buchenholzproben keine charakteristische Segmentlänge auf. Vielmehr kann die Segmentlängenverteilung über Potenzgesetze approximiert werden. Hierbei kann man unterschiedliche Regime ausmachen, die zum einen die Abstände zwischen den Tüpfeln innerhalb einer Kontaktzone (0.01–0.1 mm) und zum anderen die Abstände zwischen Kontaktzonen (0.1–3 mm) darstellen.



Verteilung der Segmentlängen der Gefässe. Bildausschnitt: Prinzip der Verbindungsanalyse über die Projektion der Bildebenen.



Anfangsviskosität verschiedener Klebstoffmischungen, gemessen mit einem Rotationsviskosimeter, sowie Härungsverhalten von UF.

Am Ende der Verteilung ist ein typisch exponentieller Abfall aufgrund der endlichen Grösse unserer Proben erkennbar [1]. Ein weiteres morphologisches Mass, insbesondere für die Modellierung, stellt die Welligkeit der Gefässe in der RL-Ebene dar, die durch die Geometrie der Holzstrahlen gegeben ist.

Das Härungsverhalten typischer Klebstoffe

Heute steht im Holzbau eine breite Palette spezialisierter Klebstoffe zur Verfügung, die sich in Zusammensetzung und Härungsverhalten stark unterscheiden. Mit Harnstoffharz (UF), Polyvinylacetat (PVAc) und Einkomponenten-Polyurethan (1K-PUR, in dieser Studie ein Präpolymer) wurden für Holz typische Klebstoffsysteme mit unterschiedlicher Härungs-

reaktion gewählt. UF härtet in einer Polykondensationsreaktion zu einem spröden Duroplast aus, wobei Wasser als Kondensat abgegeben wird. Über den Anfangswassergehalt, der dem Klebstoffpulver beigegeben wird, lassen sich die Anfangsviskosität wie auch die zeitliche Viskositätsentwicklung einstellen.

Bei Kontakt mit Holz führt das Wegschlagen von Wasser in das Mikroporensystem der Zellwände zu einer Viskositätserrhöhung, was wiederum zu einer schnelleren Aushärtung führt [2]. Die Verfestigung von PVAc geht auf den Wasserverlust der Klebstoffdispersion zurück, da Wasser sehr gut von den Holzzellwänden aufgenommen wird. Bei der Aushärtung von 1K-PUR-Klebstoffen reagieren die chemischen Bestandteile des Klebstoffs mit der Feuchtigkeit im Holz und aus der Umgebung, wobei CO₂ freigesetzt wird, was zu Schaumbildung führen kann.

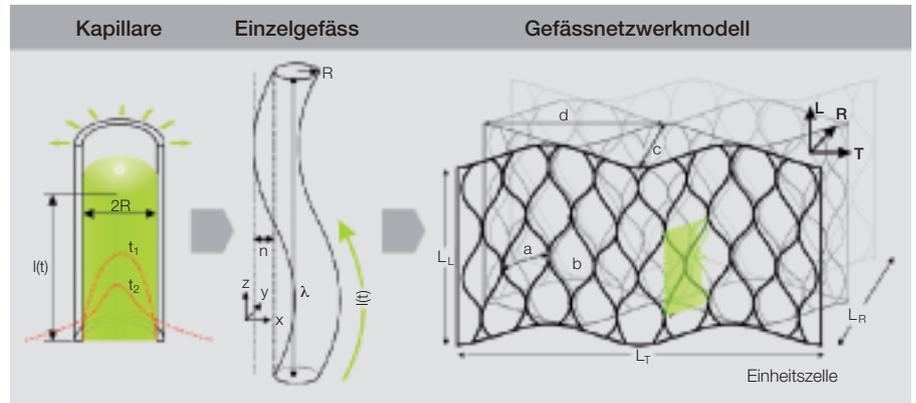
Ein grundlegendes Eindringmodell

Um das Eindringverhalten der Klebstoffe vorherzusagen, muss ihr kapillarer Transport in das Gefässnetzwerk berechnet werden. Gleichzeitig ist ihre Aushärtung zu berücksichtigen. Um ein mathematisch lösbares Eindringmodell für Klebstoffe in Buchenholz formulieren zu können, sind starke Vereinfachungen der Gefässnetzwerktopologie, der Transportprozesse sowie der Härungsvorgänge erforderlich.

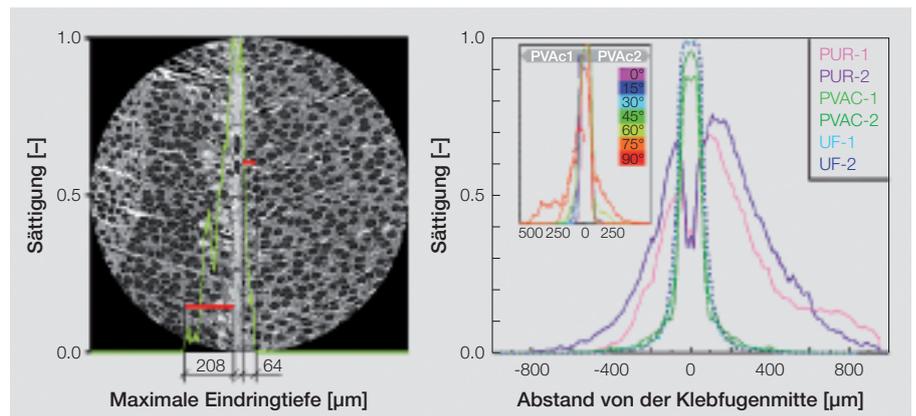
In unserem Lösungsansatz wird zunächst berechnet, wie weit der härtende Klebstoff in einer geraden Kapillare eindringt, durch deren Wände Wasser diffundieren kann. In einem zweiten Schritt wird diese Eindringlänge auf ein stark vereinfachtes Netzwerk projiziert, das einem Fischernetz nachempfunden ist. Da Gefässe jedoch nicht nur in tangentialer, sondern auch in radialer Richtung verbunden sind, bilden mehrere Ebenen in radialer Richtung gesehen ebenfalls ein solches Netz. Die Maschenweite in der RL-Ebene ist über die mittlere Grösse der Holzstrahlen gegeben, die in RT-Ebene ein frei wählbarer Parameter sind. Um die Eindringtiefe zu bestimmen, muss noch das Volumen, das maximal in die Holzstruktur eingebracht werden kann, bis die Aushärtung des Klebstoffs einen weiteren Transport unterbindet, mit der maximal zur Verfügung stehenden Klebstoffmenge verglichen werden. Ist Letztere kleiner, so «verhungert» die Klebfuge und die Tiefe wird lediglich über das Volumen des Gefässnetzwerks, das der Klebstoffmenge entspricht, bestimmt. Am Ende muss das Ergebnis noch transformiert werden, um der Ausrichtung der jeweiligen Holzteile zu entsprechen. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich in [3].

Ergebnisse

Um den Einfluss des Jahrringwinkels auf die Klebstoffpenetration zu untersuchen, wurden aus mit unterschiedlichen Jahrringwinkeln und den beschriebenen Klebstoffen verbundenen Buchenholzplatten Proben für die m-CT Untersuchung präpariert. Durch die Segmentierung der tomographischen Daten liess sich die räumliche Klebstoffverteilung bestimmen. Da durch die Form der Gefässe der eindringende Klebstoff schnell von der Klebfuge wegtransportiert wird, ist eine Charakterisierung der Klebfuge über die maximale Eindringtiefe mechanisch bedeutungslos. Vielmehr muss der eingedrungene Klebstoff ins Verhältnis zum zugänglichen Raum gesetzt werden.



Geometrie des Eindringmodells mit Einzelkapillare und Netzwerk.



Charakterisierung von Klebfugen und Mittelwertvergleiche der Klebstoffe und Orientierungen.

In den resultierenden Sättigungskurven zeichnen sich Klebfugendefekte und einseitig weggeschlagene Klebstoffe der Auftragsseite sehr stark ab. Der Einfluss des Jahrringwinkels, der ja hauptsächlich über die höhere Welligkeit und Konnektivität in tangentialer Richtung zustande kommt, zeichnet sich klar über eine breitere Klebstoffverteilung für höhere Jahrringwinkel ab.

Unser Modell geht von einer regelmässigen Netzwerktopologie und ebenen Klebflächen aus. Ausgehend von üblichen Pressdrücken und Netzwerktopologien errechnen wir für die verwendeten Klebstoffe die sich ergebenden Eindringtiefe. Dies erfolgt unter Berücksichtigung folgender Beschränkungen: (i) das gesamte Klebstoffvolumen ist penetriert oder (ii) ein Klebstofftransport ist durch

das Aushärten der Klebstoffe blockiert. Für PUR gilt die Beschränkung (i), während UF und PVAc durch Lösungsmitteldiffusion in die Zellwand, und dadurch beschleunigte Härtung, rasch fest werden (ii).

Der experimentelle Vergleich bestätigt die Gültigkeit unseres Modells im Rahmen der für diese Studie verwendeten Materialien. Da nun alle Parameter des Modells bekannt sind, können wir errechnen, wie sich Jahrringwinkel, Porosität und Härtungsparameter der jeweiligen Klebstoffe auf die Eindringtiefe auswirken. Wünschenswert ist ein kontinuierlicher Verlauf der mechanischen Eigenschaften, also eine moderate Penetration, die über die richtige Klebstoffwahl zu gewährleisten ist.

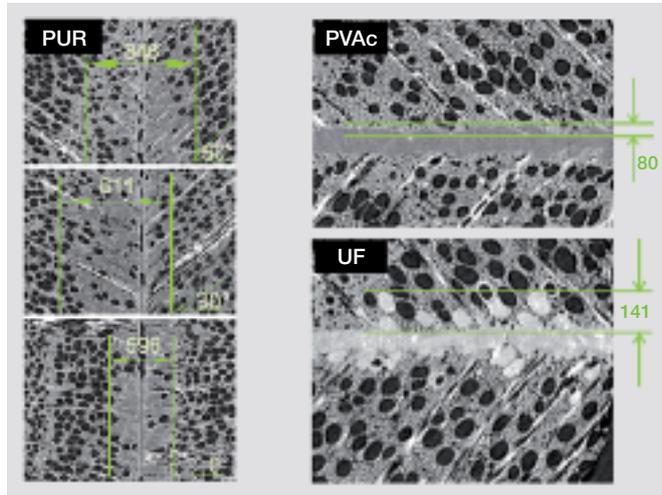
Holzeigenschaften

Fazit

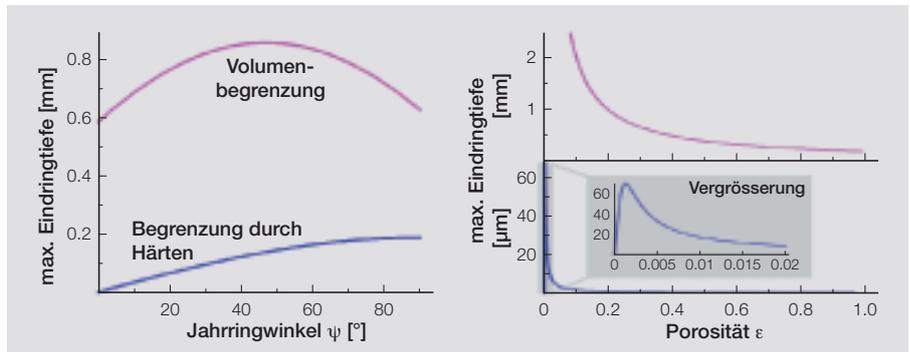
Die maximale Eindringtiefe von Klebstoffen in die Holzstruktur ist als Beurteilungskriterium für die Klebfugengüte bei Laubholz ungeeignet. Denn Klebstoffe befinden sich hauptsächlich in einzelnen Gefässen, die aufgrund der Netzwerktopologie rasch grosse Entfernungen zur Oberfläche erreichen können. Ein Kriterium auf Grundlage der Sättigung, also der Füllung des zur Verfügung stehenden Porenraums, bildet auch Defekte in der Klebfuge ab. Es ist somit für eine Beurteilung besser geeignet. Zudem können durch eine Beschränkung auf die Untersuchung von Einzelschnitten die Ergebnisse stark verfälscht werden. Auf Grundlage der charakterisierten Struktur des Gefässnetzwerks von Buchenholz konnte ein vereinfachtes Modell zur Bestimmung der Eindringtiefe aufgebaut werden. Dieses erlaubt es wiederum, das ideale Härungsverhalten von Klebstoffen für gewünschte Eindringtiefen zu bestimmen.

Dank

Wir danken dem Schweizer Nationalfonds für die Unterstützung im Projekt «Mehrskalenmodellierung von Klebfugenversagen in Holz», Nr. 116052; M. Stampanoni, S. MacDonald, F. Marone und A. Kästner für die Möglichkeit und Unterstützung bei den m-CT Messungen an der SLS beamline TOMCAT des PSI; der Purbond AG (Sempach Station) und Geistlich Ligamenta AG (Schlieren) für die Bereitstellung von Klebstoffen.



Klebfugen in repräsentativen Proben mit errechneten Eindringtiefen.



Modellvorausagen für unterschiedliche Begrenzungen als Funktion des Jahringwinkels (links) sowie Eindringtiefe für UF bei variabler Porosität.

Literatur

[1] Hass, P.; Wittel, F.K.; McDonald, S.A.; Marone, F.; Stampanoni, M.; Herrmann, H.J.; Niemz, P.; Pore space analysis of beech wood: The vessel network, *Holzforschung* 64 (2010), S. 639–644.

[2] Hass, P.; Wittel, F.K.; Mendoza, M.; Stampanoni, M.; Herrmann, H.; Niemz, P.: Adhesive penetration in Beech wood. Experiments, (2010) in Veröffentlichung in Wood Science and Technology; *arXiv: 1007.0762v1*.

[3] Mendoza, M.; Hass, P.; Wittel, F.K.; Niemz, P.; Herrmann H.J.: Adhesive Penetration of Hard Wood. A Generic Penetration Model, (2010) in Veröffentlichung in Wood Science and Technology; *arXiv: 1007.0761*.

[4] Hass, P.; Wittel, F.K.; Stampanoni, M.; Kästner, A.; Mannes, D.; Niemz, P.: 3D Characterization of Adhesive Penetration into Wood by Means of Synchrotron Radiation, in *Proceedings of International Conference on Wood Adhesives*, Sept. 2009, Lake Tahoe, Nevada, USA (2010).