

Volltränkung modifizierten Holzes mit Wachs

G. Scholz · A. Krause · H. Militz

Eingegangen: 7. Oktober 2009 / Online publiziert: 21. September 2010
© The Author(s) 2010. Dieser Artikel ist auf Springerlink.com mit Open Access verfügbar

Zusammenfassung Acetyliertes, thermisch modifiziertes (TMT) und mit Dimethylol-dihydroxy-ethylenurea (DMDHEU) behandeltes Kiefernholz wurde mit Wachs vollimprägniert. Untersucht wurde der Einfluss hydrophober Wachsdepositen auf die kapillare Wasseraufnahme und die Festigkeiten der bereits modifizierten Hölzer. In longitudinaler Richtung wurde die Wasseraufnahme mit $0,03 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ um das 28fache (Acetylierung) bzw. mit $0,13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ um das 12fache (TMT) gesenkt. In tangentialer Richtung verringerte sich die Wasseraufnahme mit $0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ um das 9fache (Acetylierung) bzw. mit $0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ um das 12fache (TMT) im Vergleich zu den modifizierten Referenzen. Die Biegefestigkeit von TMT nahm durchschnittlich um 45 %, die Bruchschlagarbeit um 64 % zu. Eine Steigerung der Brinellhärte quer zur Faser um etwa 420 % wurde für TMT erreicht. Eine Reduzierung der mechanischen Eigenschaften, welche durch den Herstellungsprozess von TMT auftreten, wird durch die Vollimprägnierung mit Wachs zum Teil kompensiert. Für acetyliertes Holz bewirkte die Wachsimprägnierung insbesondere einen Anstieg der Druckfestigkeit um 47 % bzw. einen um 66 % erhöhten Biege-Elastizitätsmodul. Die Brinellhärte quer zur Faser erreichte bei der Acetylierung mit ca. 109 N/mm^2 die höchsten Werte. Für DMDHEU modifiziertes Holz wurde die Wasseraufnahme um 42 % gesenkt. Die durch die Modifizierung stark herabgesetzte Bruchschlagarbeit erhöhte sich um 45 %. Die Brinellhärte quer zur Faser nahm infolge der Wachsimprägnierung um 150 % zu. Die Wachsimprägnierung führte zu zunehmender Hydrophobierung und Stär-

kung der durch die jeweilige Modifizierung geschwächten Holzstruktur.

Full impregnation of modified wood with wax

Abstract Acetylated timber, thermally modified timber (TMT) and timber modified with dimethylol-dihydroxy-ethylenurea (DMDHEU) was impregnated with wax. Subsequently, the influence of hydrophobic wax deposits on the capillary water uptake and the strength properties of the pre-modified timber were investigated. The water uptake in longitudinal direction decreased to $0.03 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ for acetylated timber and $0.13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ for TMT. In tangential direction it was reduced to $0.02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ (acetylated wood) and $0.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0,5}$ (TMT). Thus, water uptake of acetylated timber was lowered by a maximum of factor 28 in longitudinal and factor 9 in tangential direction. For TMT, water uptake was reduced by factor 12 in both directions. For both cases, the pre-modified material without wax treatment was measured as reference. The bending and impact bending strength of TMT increased by a maximum of up to 45% and 64%, respectively. The Brinell hardness perpendicular to the grain rose by up to 420%. Consequently, strength losses due to thermal modification were partly compensated by subsequent wax impregnation. The compression strength increased by up to 47% and the modulus of elasticity by up to 66% for acetylated timber. For the same material, the hardness perpendicular to the grain peaked at 109 N/mm^2 . The longitudinal water uptake of timber modified with DMDHEU decreased by a maximum of 45% after impregnation with wax, whereas Brinell hardness perpendicular to the grain increased by 150%. Besides diminished water uptake, a reinforcement of wood structure degraded after preceding modification can be accomplished by wax treatment.

G. Scholz · A. Krause · H. Militz (✉)
Department of Wood Biology and Wood Products,
Georg-August-University Göttingen, Büsgenweg 4,
37077 Göttingen, Germany
e-mail: hmilitz@gwdg.de

1 Einleitung

Nach Illmann et al. (1983) sind Wachse Ester langkettiger Fettsäuren mit langkettigen Alkoholen, die aus dem pflanzlichen und tierischen Metabolismus stammen. Verschiedene synthetische Stoffe wie Polyolefine, Fischer-Tropsch-Wachse (Illmann et al. 1983) oder Amidwachse entsprechen zwar hinsichtlich ihrer chemischen Struktur nicht den klassischen Wachsen, aufgrund ihrer physikalisch-technischen Eigenschaften (z. B. Schmelzpunkt, temperaturabhängige Viskosität, Molmasse, etc.) werden sie jedoch als Wachse eingestuft (DGF-Einheitsmethoden 1975). Sie werden in der Kunststoffbranche als Trennmittel und für Pigmente, im Lebensmittelbereich zur Feuchtekonservierung von Käse oder Citrusfrüchten oder für Polituren, Kosmetika und Schuhcreme verwendet (Illmann et al. 1983). Wachse und Paraffine werden im Holzsektor zumeist als Additive zur Hydrophobierung als Emulsionen (Deppe und Ernst 1996), in Beschichtungssystemen oder in Kombination mit Holzschutzmitteln eingesetzt. Reines Wachs wird hingegen selten genutzt. Für die Holzkonservierung und Holzfestigung werden u. a. Bienen- und Carnaubawachs sowie Paraffine empfohlen (Unger et al. 2001). Mundigler und Rettenbacher (2005) verweisen auf gesteigerte Härten bei Harz-Wachsimprägnierungen von Holz. Scheiding (2007) ermittelte bei mit Wachs imprägniertem Thermoholz erhöhte Biegeigenschaften und Härten.

Die thermische Modifizierung von Holz (nachfolgend als TMT bezeichnet) wird nach Militz (2002) bei Temperaturen zwischen 160–260 °C durchgeführt. Dadurch kommt es zu hydrolytischen Spaltungen der Polysaccharide, Oxidations-, Kondensations- und Radikalreaktionen (Militz und Mai 2008). Nach Lukowsky et al. (2002) wird das Sorptionsvermögen des Holzes reduziert, so dass die Dimensionsstabilität deutlich zunimmt. Im Vergleich zum unbehandelten Holz quillt und schwindet das Holz dann um 15–40 % weniger (Homan 2004). Neben einer dekorativen Dunkelfärbung wird auch die Resistenz gegenüber Pilzen gesteigert (Ewert und Scheiding 2005). Die thermische Behandlung bewirkt Masseverluste infolge des Zellwandabbaus (Militz und Mai 2008), insbesondere von Hemicellulosen und ab 200 °C bei Lignin (Windeisen et al. 2007) und damit eine Dichtereduktion. Hinzu kommen die Versprödung und Rissbildung in der Zellwand und die Delaminierung der einzelnen Zellwandschichten sowie der Mittellamellen (Fengel und Wegener 2003; Birkinshaw und Dolan 2009). Bei allen thermischen Modifizierungen kommt es hierbei in Abhängigkeit der Behandlungsdauer und Temperatur zu Festigkeitsverlusten und Versprödungen insbesondere bei Nadelholz (Ewert und Scheiding 2005), die zum Teil bestimmte Applikationen beispielsweise im konstruktiven Bereich limitieren. Die etablierten Verfahren unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der Temperatur und Prozessdauer (Homan 2004;

Militz und Mai 2008). Sie werden in Stickstoff- und hydrothermischer Atmosphäre sowie in erhitztem Öl durchgeführt. Über 80 % des gesamten TMT werden mit Heißluft und Wasserdampf gefertigt (Ewert und Scheiding 2005). Einsatzgebiete bestehen im Fußbodenbereich, als Fassaden, im Fenster-, Landschafts- und Gartenbau oder im Kanalbau (Ewert und Scheiding 2005).

Bei der Acetylierung ist die Imprägnierung von Acetanhydrid in Holz und deren Veresterung mit den Hydroxylgruppen der Zellwand unter Abspaltung von Essigsäure technisch zur Prozessreife gelangt (Militz und Mai 2008). Das Holz wird nach erfolgter Behandlung in einen Zustand permanenter Quellung versetzt (Larsson Breid 1998). Dadurch wird eine Reduzierung der Ausgleichsfeuchte, eine Verringerung des Quell- und Schwindverhaltens um bis zu 90 %, hohe Dimensionsstabilität und Resistenz gegenüber Pilzen erreicht (Beckers et al. 1994; Militz et al. 1997; Larsson Breid 1998; Militz und Mai 2008). Bei einem geringfügigen Dichteanstieg bei *Pinus radiata* bleiben die Festigkeiten sowie die Bruchschlagarbeit unverändert oder werden im Fall der Härte erhöht (Tjeerdsma und Pfeiffer 2006). Nach Militz und Mai (2008) ist bei größeren Dimensionen die Evakuierung von Essigsäure beispielsweise aufgrund der Geruchsbelästigung aus dem Holz erschwert. Nach Bongers et al. (2009) wird acetyliertes Holz im Haus-, Fassaden- und Brückenbau verwendet.

Nach Militz und Mai (2008) können auch Moleküle mit *N*-Methylolgruppen wie DMDHEU (Dimethyloldihydroxy-ethylenurea) oder deren Derivate eingesetzt werden. Die Moleküle können sowohl in der Zellwand polymerisieren bzw. über die *N*-Methylolgruppen mit den Zellwandpolymeren vernetzen. Die Zellwand wird dabei im gequollenen Zustand fixiert. Die Quellung und Schwindung wird um bis zu 70 % reduziert. Des Weiteren wird die Dauerhaftigkeit verbessert und ein Bewitterungsschutz erreicht. Das behandelte Holz bleibt anfällig gegenüber Schimmelfall (Homan et al. 2007). Die Biegefestigkeit (Nicholas und Williams 1987) und Bruchschlagarbeit (Schaffert 2006) werden reduziert, die Härte hingegen erhöht (Krause 2006; Militz und Mai 2008). Anwendungen bestehen als Parkett sowie im Garten-, Fenster- und Möbelbau.

Die hydrophobierende Wirkung von Wachs in Massivholz wird von Scholz et al. (2009) quantifiziert. Scholz et al. (2009, 2010) verweisen auf die Erhöhung der Festigkeiten durch die Vollimprägnierung von Massivholz. Dabei wurde auch ein Einfluss des Wachstyps festgestellt. Demnach erhöhten sich die Biegefestigkeit wachsextrahierten Kiefernspilts um bis zu 25 % bzw. die Bruchschlagarbeit um bis zu 31 % (Scholz et al. 2010). Speziell diese mechanischen Kennwerte werden bei der thermischen und chemischen Holzmodifizierung oftmals verschlechtert. Die Wachsimprägnierung soll dazu beitragen, verschlechterte Festigkeiten bereits modifizierten Holzes zu erhöhen. Des Wei-

Tab. 1 Übersicht über die Materialherkunft und die Abmessungen bei der Imprägnierung
Table 1 Overview of material origin and dimensions during impregnation

Name	Typ	Hersteller	Holzart	Abmessung [mm ³]
Licolub WM31	Montanesterwachs	Clariant	–	Granulat
TMT	thermisch modifiziert (Stellac [®])	Firstwood	<i>Pinus sylvestris</i>	380 × 40 × 30
Acetylierung	Acetylierung (Accoya [®])	Titan Wood	<i>Pinus radiata</i>	380 × 150 × 40
DMDHEU	<i>N</i> -Methylolvernetzer (Belmadur [®])	BASF	<i>Pinus sylvestris</i>	380 × 120 × 28

Tab. 2 Verwendete Normen und Prüfvorschriften (Prüfklima: 20 °C, 65 % relative Luftfeuchte)

Table 2 Applied standards and test procedures (climate: 20 °C, 65 % relative air humidity)

Kenngröße	Einheit	Format [mm]	Prüfkörper unbehandelt	Prüfkörper behandelt	Standard
Dichte	g/cm ³	30 × 20 × 20	35–43	37–42	DIN 52 182 (1976)
Wasseraufnahme					
tangential	kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}	40 × 40 × 25	10–12	10–12	DIN 52 617 (1987)
longitudinal	kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}	200 × 20 × 20	10–12	10–12	DIN 52 617 (1987)
Druckfestigkeit	N/mm ²	30 × 20 × 20	33–50	37–42	DIN 52 185 (1976)
Biegefestigkeit	N/mm ²	180 × 10 × 10	34–47	40–46	DIN 52 186 (1978)
Biege-E-Modul	N/mm ²	180 × 10 × 10	34–47	40–46	DIN 52 186 (1978)
Bruchschlagarbeit	kJ/m ²	150 × 10 × 10	34–41	43–52	DIN 52 189-1 (1981)
Härte	N/mm ²	30 × 30 × 30	29–42	21–44	EN 1534 (2000)

teren wird der Einfluss des hydrophoben Imprägniermittels auf die kapillare Wasseraufnahme untersucht.

2 Material und Methoden

Tab. 1 gibt einen Überblick hinsichtlich des verwendeten Materials. Nach Trocknung in der Imprägnieranlage (100 °C/100 mbar) erfolgte die Volltränkung mit einem Montanesterwachs (C₂₄/C₃₄) unter Vakuum-Druck bei 100 °C (60 min/120 min) bei 12 bar. Die Versuche erfolgten an kernfreien Probenabschnitten. Zur optischen Visualisierung wurde ein blauer Farbstoff verwendet (Fett-Blau, Clariant). Die Prüfungen erfolgten an klimatisierten Proben (20 °C/65 % relative Luftfeuchtigkeit).

In Tab. 2 sind die verwendeten Prüfnormen aufgeführt. Abweichend von der Norm lag die unversiegelte Querschnittfläche der Prüfkörper zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme unter 50 cm². Die Prüfkörper wurden mit wasserdichtem Klebeband (Siga-Rissan) versiegelt. Periodisch (0 h, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, 48 h, dann alle 48 h) wurde durch Wägungen die kapillare Wasseraufnahme ermittelt (Formel (1)). Rechnerisch wurde mit Formel (2) der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient ermittelt. Dieser entspricht dem Steigungswinkel der Graphen.

$$WA_k = \frac{m_{kap} - m_{atro}}{A} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

$$k_{WA} = \frac{WA_k}{\sqrt{t}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}] \quad (2)$$

WA_k kapillare Wasseraufnahme des Materials

k_{WA} kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient

m_{kap} Gewicht des Prüfkörpers während des jeweiligen Zustands

m_{atro} Darrgewicht des Prüfkörpers

A unversiegelte Fläche mit Kontakt zum Wasser

t Dauer der kapillaren Aufnahme

Die Bestimmung der Biegefestigkeit erfolgte an Prüfkörpern mit Querschnitten von 10 × 10 mm². Die Bruchschlagarbeit wurde mit einem Auflagenabstand von 140 mm durchgeführt. Die Prüfkörper wurden in radialer Richtung bei einem Arbeitsvermögen des Pendelschlagwerks von 8,05 J durchschlagen. In Abweichung zu EN 1534 erfolgte die Bestimmung der Härte über die Eindringtiefe und daraus resultierende Mantelfläche des Kugelabdrucks. Die Signifikanz der Ergebnisse wurde statistisch mit dem *t*-Test für unabhängige Stichproben bei einem Vertrauensintervall von 95 % überprüft.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Dichte

Durch die Vollimprägnierung mit Wachs kommt es bei allen drei modifizierten Holzarten aufgrund der Wachsein-

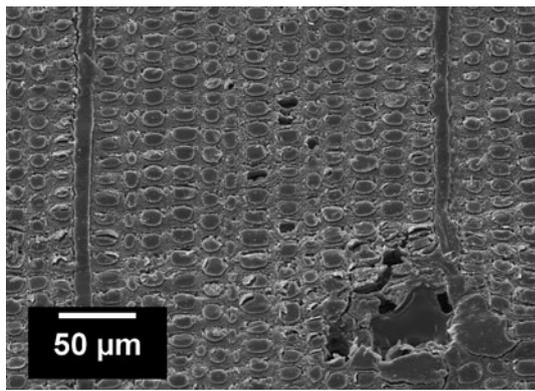


Abb. 1 Wachsdepositen in Kiefernspint (REM Aufnahme des Querschnitts)

Fig. 1 Wax deposits in Scots pine sapwood (SEM image of the cross section)

lagerung im Lumen (Abb. 1) zu einer signifikanten Dichtesteigerung. Die Dichte thermisch modifizierten Kiefernspints beträgt durchschnittlich $0,47 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$. Die Volltränkung führt zu einem Dichtezuwachs auf $1,01 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$. Das entspricht einem Beladungsgrad (WPG) von 115 %. Die Dichte acetylierten Holzes erhöht sich auf $1,01 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ (106 % WPG), die von mit DMDHEU behandelte Kiefer auf $1,00 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ (82 % WPG). Die Aufnahme von Wachs bewirkt Dichtesteigerungen, die mit denen schwerer tropischer Kernhölzer vergleichbar sind (s. Tab. 3). So besitzt Bongossi (*Lophira alata*) eine Dichte zwischen $0,97\text{--}1,15 \text{ g/cm}^3$ (Wagenführ und Scheiber 1989).

3.2 Kapillare Wasseraufnahme

In Abb. 2 ist beispielhaft die Wasseraufnahme für wachsbehandeltes TMT und die modifizierten Referenzen in tangentialer Richtung dargestellt. Zur Berechnung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten wurden Linearabschnitte der Kurve verwendet. Bedingt durch das Quellen des Holzes und der Änderung der Kapillarengößen ist ein vollständig linearer Kurvenverlauf nicht zu erwarten. Unbehandeltes TMT weist einen axialen Wasseraufnahmekoeffizienten von $1,59 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$ auf. Der tangentialer Wert beträgt $0,42 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$. Der tangentialer Wasseraufnahmekoeffizient ist mit den $0,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$ unbehandelter Kiefer (Schmid et al. 2006) zu vergleichen. Trotz der Hydrophobierung ist das Kapillarsystem weiterhin frei zugänglich. Mikrorisse, unterschiedliche Kapillargrößen oder chemische Veränderungen mit schnellerer Sättigung hydrophiler Bestandteile können eine Rolle spielen (Schmid et al. 2006). Die Füllung des Hohlraumes von Holz mit dem hydrophob wirkenden Wachs führt zu einer signifikanten Reduzierung auf $0,13 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$. Das ist weniger als Teak axial aufnimmt ($0,27 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$). In tangentialer Exposition sinkt die Wasseraufnahme von $0,42 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$

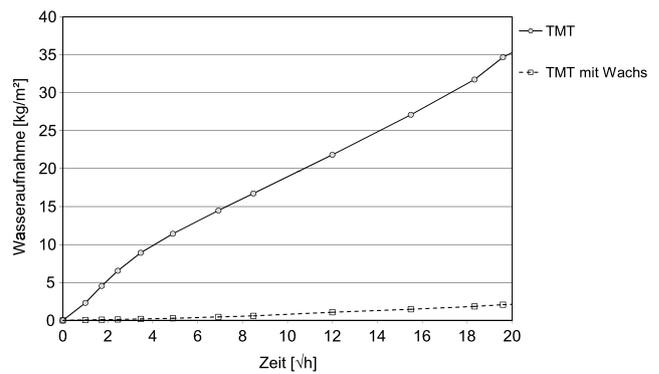


Abb. 2 Tangentiale Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit für TMT

Fig. 2 Tangential water uptake over the time for TMT

durch die Wachsdepositen auf $0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$ ab (Teak: $0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$).

Die kapillaren Wasseraufnahmen von acetyliertem und mit DMDHEU behandeltem Holz liegen bei den Referenzen niedriger als bei TMT (s. Tab. 3). Die im Vergleich zu TMT niedrigere Aufnahme resultiert aus dem niedrigeren Quellvermögen der modifizierten Zellwand um bis zu 90 % bei der Acetylierung bzw. 70 % bei DMDHEU (Larson Brelid 1998; Militz und Mai 2008). Die Kombination mit Wachs führt bei der Acetylierung zu verminderten Wasseraufnahmekoeffizienten mit $0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$ (tangential) bzw. $0,03 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$ (axial). Die Eindringung von Wasser wird durch die Präsenz des hydrophoben Wachses sowie die wenig quellfähige Zellwand signifikant herabgesetzt.

Die Wasseraufnahme in axialer Richtung ist für DMDHEU mit $0,48 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$ von allen drei modifizierten Varianten am niedrigsten. Möglicherweise ist dies im Vergleich zur höheren Quellungsvergütung der Acetylierung auf zusätzliche stoffliche Depositen (*N*-Methylol-Verbindungen) im Lumen des Holzes und den Tüpfelübergängen zurückzuführen. Die Einlagerung von Wachs bewirkt eine signifikante Herabsetzung der axialen Wasseraufnahme. Da bei dieser Modifizierungsart die Durchtränkung mit Wachs nicht bei allen Prüfkörpern vollständig erfolgt ist, liegt der Wasseraufnahmekoeffizient mit durchschnittlich $0,28 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-0,5}$ im Vergleich zur imprägnierten TMT- bzw. acetylierten Variante höher.

3.3 Druckfestigkeit

In Tab. 3 sind die Ergebnisse zur Druckfestigkeit aufgelistet. Diese erhöhte sich bei TMT durch die Wachsbehandlung signifikant von $58 \pm 6 \text{ N/mm}^2$ auf $64 \pm 8 \text{ N/mm}^2$. Nach Kollmann (1951) knicken die Fasern während des Bruchvorgangs in Richtung der größten Schubspannung aus. Die kompakten Wachsdepositen in den Hohlräumen des Holzes verstärken die Fasern, verhindern damit deren Ausknicken

Tab. 3 Kennwerte modifizierter und anschließend mit Wachs vollimprägnierter Hölzer sowie von Teak (*Tectona grandis*)
Table 3 Parameters of modified and subsequently fully impregnated timbers as well as of teak (*Tectona grandis*)

Physikalisch	Einheit	Thermoholz	Thermoholz/Wachs	Acetylierung	Acetylierung/Wachs	Belmadur	Belmadur/Wachs	Teak
Dichte	[g/cm ³]	0,42...0,47...0,51	0,97...1,01...1,05	0,46...0,49...0,50	0,78...1,01...1,09	0,61...0,65...0,71	0,78...1,00...1,13	0,57...0,63...0,71
kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient								
<i>tangential</i>	[kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}]	0,42	0,05	0,17	0,02	–	–	0,08
<i>axial</i>	[kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}]	1,59	0,13	0,84	0,03	0,48	0,28	0,27
Mechanisch								
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	33,0...57,7...65,3	36,2...63,6...74,2	17,5...43,9...47,8	53,9...64,6...73,9	35,4...83,5...98,6	74,4...95,8...113,2	37,3...50,7...64,5
Biegefestigkeit	[N/mm ²]	54,7...80,9...104,0	86,7...116,9...149,0	60,6...79,4...97,7	59,7...102,0...148,0	55,0...94,4...128	37,8...92,2...131,0	83,4...113,8...130,0
Biege-E-Modul	[N/mm ²]	10.444	12.815	6.004	9.945	12.683	12.374	11.839
Bruchschlagarbeit ^a	[N/mm ²]	7,3...15,2...25,1	6,8...25,3...43,4	9,0...19,5...30,6	6,7...20,4...76,9	1,5...6,5...9,9	5,6...9,4...22,3	11,0...25,2...40,8
Härte								
<i>radial</i>	[N/mm ²]	9,2...9,8...10,9	15,5...57,4...93,4	17,8...28,3...52,5	82,3...110...108	12,1...17,5...26,1	20,6...53,3...74,7	26,2...37,9...50,0
<i>tangential</i>	[N/mm ²]	6,9...13,3...19,6	36,2...63,1...86,4	15,1...22,0...40,6	65,6...108...153	19,4...26,3...32,9	38,4...57,4...76,5	27,1...34,6...40,2
<i>axial</i>	[N/mm ²]	46,6...55,5...64,9	35,0...75,5...108	42,1...57,6...89,7	81,3...119...145	62,0...82,4...106	81,5...102...168	54,9...63,8...75,5

^aDurchführung der Prüfung nicht nach Norm (Auflagenabstand höher)

und erhöhen damit u.a. die Druckfestigkeit um ca. 10 %. Die durch Mikrorisse beeinträchtigte Zellwand (Fengel und Wegener 2003) wird durch die Wachsdepositen aber vermutlich nur bedingt gestützt. Des Weiteren können nach Scholz et al. (2010) Mikrokapillaren zwischen Zellwand und Wachsdepositen infolge der Volumenreduktion beim Abkühlen eine Rolle spielen.

Die Wachsvolltränkung bewirkt bei acetyliertem Holz eine Steigerung der Druckfestigkeit um durchschnittlich 47 %. Nach Scholz et al. (2010) kann die große Steigerung der Druckfestigkeit auf die vergleichsweise niedrigen natürlichen Festigkeiten (acetylierter) Kiefer zurückzuführen sein. Wagenführ (2000) gibt 65 N/mm^2 als Obergrenze für Radiata-Kiefer an. Die eingelagerten Wachsdepositen verschieben diesen Wert jedoch in Richtung des Mittelwertes.

Mit $84 \pm 12 \text{ N/mm}^2$ wurden bereits sehr hohe Werte für die DMDHEU ohne Wachstränkung ermittelt ($35\text{--}94 \text{ N/mm}^2$ für Kiefer nach Wagenführ 2000). Das abrupte Bruchverhalten deutet auf die primäre Bedeutung sowie Versprödung der Holzzellwand hin. Bedingt durch die Wachsimprägnierung steigt die Druckfestigkeit um ca. 15 % an.

3.4 Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul

Die Wachsimprägnierung von TMT bewirkte eine signifikante Steigerung der Biegefestigkeit von $81 \pm 11 \text{ N/mm}^2$ auf $117 \pm 14 \text{ N/mm}^2$. Das entspricht einem Festigkeitszuwachs von ca. 45 %. Nach Ewert und Scheiding (2005) sinkt die Biegefestigkeit um 30 % bzw. 38 % (Welzbacher 2007) bis zu 50 % (Birkinshaw und Dolan 2009). Die Angaben schwanken je nach Behandlungsart und vor allem Behandlungsdauer. Die Wachseinbringung bewirkt eine Kompensation der infolge der thermischen Modifizierung auftretenden Biegefestigkeitsverluste. Der Biege-Elastizitätsmodul ist bei TMT nach Welzbacher (2007) eine unkritische Prüfgröße, da er maximal um 15 % absinkt. Wachsbehandelte Prüfkörper wiesen eine Erhöhung des E-Moduls von durchschnittlich 10.444 N/mm^2 auf 12.815 N/mm^2 auf. Das entspricht einer Steigerung von etwa 23 % und damit vollständigen Kompensation der Festigkeitsverluste. Die Standardabweichungen betragen 1.013 N/mm^2 (modifiziert) bzw. 1.154 N/mm^2 (nach Wachsimprägnierung).

Der Festigkeitszuwachs infolge der eingelagerten Wachsdepositen beträgt 28 % bei acetyliertem Holz. Der Biege-Elastizitätsmodul nimmt um ca. 66 % zu. Nach Larsson und Tillman (1989) wird die Biegefestigkeit acetylierter Kiefer nicht bzw. nach Goldstein et al. (1961) um 10 % gesteigert. Der Biege-Elastizitätsmodul steigt um 5 % (Goldstein et al. 1961) bzw. sinkt um 17 % nach Larsson und Tillman (1989). Die Biegeeigenschaften werden durch eine Wachsbearbeitung deutlich gesteigert. Die erreichten Biegefestigkeiten übersteigen die von unbehandelter *Pinus radiata* ($60\text{--}91 \text{ N/mm}^2$) und sind mit den $41\text{--}205 \text{ N/mm}^2$ von *Pinus sylvestris* zu vergleichen (Werte aus Wagenführ 2000).

Die Behandlung mit Wachs zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Biegeeigenschaften von mit DMDHEU behandeltem Holz. Nach Nicholas und Williams (1987) bewirkt die Behandlung mit DMDHEU eine Abnahme der Biegefestigkeit. Schaffert (2006) konnte hinsichtlich der Biegeeigenschaften keine signifikanten Unterschiede zwischen behandelten Prüfkörpern und deren Kontrollen feststellen. Er beobachtete eine Reduktion der Durchbiegung zwischen 40–60 % und ein signifikant verändertes Bruchverhalten bei Überschreitung der Höchstkraft.

3.5 Bruchschlagarbeit

Die Bruchschlagarbeit von TMT wurde infolge der Wachsbearbeitung von $15 \pm 4 \text{ N/mm}^2$ auf $25 \pm 8 \text{ N/mm}^2$ erhöht. Das entspricht einer Steigerung von ca. 64 %. Sinkende Bruchschlagarbeiten – durch zunehmende Sprödigkeit – sind bei thermisch modifizierten bekannt (Schneider 1971; Finish ThermoWood Association 2003). Nach Ewert und Scheiding (2005) sinkt die Bruchschlagarbeit von Thermoholz um bis zu 60 %, was seine Verwendungsbereiche einschränkt. Dieser Applikationsnachteil kann durch die Wachsimprägnierung möglicherweise zum Teil kompensiert werden. Die Bruchschlagarbeit wird vor allem durch die Faserlänge und die Rohdichte des Holzes (Niemz 1993), aber auch dessen Sprödigkeit (Harzmann 1988) bestimmt. Vermutlich wird sich darum die Wachsimprägnierung mit steigender thermischer Behandlungsintensität des Holzes positiver auf die Bruchschlagarbeit auswirken.

Nach Tjeerdsma und Pfeiffer (2006) wird die Bruchschlagarbeit durch die Acetylierung nicht beeinträchtigt. Die anschließende Wachsimprägnierung bewirkt keine signifikante Erhöhung dieser dynamischen Festigkeit (s. Tab. 3).

Die Bruchschlagarbeit von mit DMDHEU behandeltem Holz steigt um 45 % gegenüber den Kontrollen an. Nach Schaffert (2006) wird die Bruchschlagarbeit von mit DMDHEU behandeltem Holz auch bei niedrigen Konzentrationen um ca. zwei Drittel herabgesetzt. Damit trägt die Einlagerung von Wachsen zwar zu einer signifikanten Erhöhung dieses Kennwertes bei. Allerdings liegen die erzielten Bruchschlagarbeiten immer noch deutlich unter den Ausgangswerten.

3.6 Oberflächenhärte

Mit Wachs vollimprägniertes TMT wies folgende Härtezuwächse auf (s. Tab. 3): 490 % (radial), 370 % (tangential) und 36 % (axial). In der Literatur wird die tangential und radiale Härte oft als Seitenhärte zusammengefasst, was einer Steigerung von 430 % bezogen auf die Referenz entspricht. Die Holzhärte erhöht sich nach Scheiber (1965) u.a. durch die Einlagerung von Gerbstoffen und mineralischen Inhaltsstoffen im Holz. Bei der Wachsimprägnierung gilt

diese Aussage analog. Beim Eindringen eines Fremdkörpers steht den sich ausknickenden Fasern kein Ausweichraum zur Verfügung, da die Lumen des Holzes weitgehend mit Wachs gefüllt sind. Nach Lohmann (1991) beträgt das Verhältnis zwischen der Härte quer bzw. parallel zur Faser bei leichten Holzarten 1 : 2. Bei unbehandeltem Kiefernspint von TMT war dieses Verhältnis mit 1 : 4,8 noch wesentlich höher. Die Wachstränkung führt zu einer Homogenisierung dieses Verhältnisses von 1 : 1,3. Die ermittelten Härten für thermisch modifiziertem und mit Wachs behandeltem Kiefernspint sind wesentlich höher als die Seitenhärten von Buche und Eiche (34 N/mm²). Mit durchschnittlich 75,5 N/mm² liegt auch die Härte parallel zur Faser tendenziell über jener der genannten Holzarten (s. Wagenführ und Scheiber 1989) wie Buche (72 N/mm²) und Eiche (66 N/mm²).

Bei der Acetylierung wurde eine Seitenhärte von ca. 25 N/mm² ermittelt (s. Tab. 3). Durch die Wachsaufnahme wurden Härtezuwächse um 333 % erzielt, was ca. 109 N/mm² entspricht. Auch die Härte parallel zur Faser erhöhte sich von 58 ± 13 N/mm² auf 119 ± 15 N/mm² um 105 %. Schmid et al. (2006) ermittelten für acetylierte Kiefer eine Seitenhärte von 22 N/mm². Die Wachsdepositen im acetylierten Holz bewirken einen Anstieg der Seitenhärte. Die erzielten Werte liegen über denen von Bongossi (*Lophira alata*) welche nach Wagenführ und Scheiber (1989) 65–90 N/mm² aufweist. Sie liegt im Bereich von Pockholz (*Guaiacum officinale*), dessen Seitenhärte zwischen 88–150 N/mm² angegeben wird (Wagenführ und Scheiber 1989). Solche Härten werden aufgrund des stabilen Zellwandgefüges und den Hohlraum auskleidenden Wachsdepositen erreicht. Die Wachseinlagerung bewirkt eine Homogenisierung zwischen der Härte quer bzw. parallel zur Faser im Verhältnis von 1 : 1,1 für acetyliertes Holz.

Die ermittelte Seitenhärte von Belmadur[®] beträgt ca. 22 N/mm² und steigt infolge der Wachstränkung auf 50 N/mm² um 129 % an. Die axiale Härte steigt von 82 ± 10 N/mm² auf 102 ± 18 N/mm² an, was einer Erhöhung um 24 % entspricht. Nach Schmid et al. (2006) wurde für die Seitenhärte von DMDHEU-Kiefer ein Wert von 23 N/mm² gemessen. Schaffert (2006) berichtet von einer nur marginalen Erhöhung der Seitenhärte bei methyliertem DMDHEU, während nicht methyliertes DMDHEU in 30 %iger Konzentration eine Härtesteigerung um 75 % bewirkte. Krause (2006) ermittelte Härtezuwächse von bis zu 300 % bei nicht methyliertem DMDHEU in 60 %iger Konzentration.

4 Schlussfolgerungen

Die Vollimprägnierung acetylierten, thermisch modifizierten und mit DMDHEU behandelten Holzes mit Wachs führt

zu signifikanten Steigerungen der Dichte und Festigkeiten bzw. zur Verminderung der Wasseraufnahme. Die ermittelten Kennwerte zeigen eine Herabsetzung der kapillaren Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit, die deutlich unter der von Teakholz liegt. Die durch thermische Modifizierung absinkenden Festigkeitseigenschaften, insbesondere die Biegefestigkeit und Bruchschlagarbeit, können zum Teil kompensiert werden. Auch die moderaten Festigkeiten von acetyliertem Holz erhöhen sich signifikant, vor allem die Druck- und Biegefestigkeit sowie der Biege-Elastizitätsmodul. Die Wachseinlagerung führte bei DMDHEU behandeltem Holz lediglich bei der Druckfestigkeit zu signifikanten Festigkeitssteigerungen. Die Erhöhung der Bruchschlagarbeit konnte die im Zuge der Modifizierung mit DMDHEU deutlich abgesunkenen Ausgangswerte nicht annähernd kompensieren. Am höchsten sind die Härtezuwächse bei allen drei nachbehandelten Modifizierungen, die in seitlicher Exposition mit den Härten schwerer tropischer Kernhölzer zu vergleichen sind. Die Nachbehandlung modifizierten Holzes ist mit zusätzlichen Kosten (Wachseinkauf, Prozesskosten, etc.) verbunden. Nach Scholz et al. (2010) spielen dabei die Wachstypen aufgrund unterschiedlicher Preise bzw. Auswirkungen auf die Festigkeiten eine Rolle. Zusammengefasst erscheinen neue Applikationen für acetyliertes und thermisch modifiziertes Holz mittels Wachsbearbeitung möglich.

Danksagung Die Autoren danken der Clariant Produkte Deutschland GmbH, Gersthofen, für die finanzielle und materielle Unterstützung des Projekts.

Open Access Dieser Artikel unterliegt den Bedingungen der Creative Commons Attribution Noncommercial License. Dadurch sind die nichtkommerzielle Nutzung, Verteilung und Reproduktion erlaubt, sofern der/die Originalautor/en und die Quelle angegeben sind.

Literatur

- Beckers EPJ, Militz H, Stevens M (1994) Resistance of acetylated wood to basidiomycetes, soft rot and blue stain. IRG/WP 40021, International Research Group on Wood Preservation, Stockholm, Sweden
- Birkinshaw C, Dolan S (2009) Mechanism of strength loss in heat treated softwoods. In: Englund F, Hill CAS, Militz H, Segerholm BK (Hrsg) Proceedings of the Fourth European Conference on Wood Modification, Stockholm, Sweden, pp 337–343
- Bongers F, Roberts M, Stebbins H, Rowell R (2009) Introduction of Accoya[®] Wood on the market – Technical aspects. In: Englund F, Hill CAS, Militz H, Segerholm BK (Hrsg) Proceedings of the Fourth European Conference on Wood Modification, Stockholm, Sweden, pp 301–309
- Deppe H-J, Ernst K (1996) MDF – Mitteldichte Faserplatten. DRW, Leinfelden-Echterdingen
- DGF-Einheitsmethoden (1975) Untersuchung von Fetten, Fettprodukten und verwandten Stoffen, Abteilung M: Wachse und Wachstprodukte, Wissenschaftl. Verlagsges, Stuttgart
- DIN 52 182 (1976) Prüfung von Holz. Bestimmung der Rohdichte. Beuth, Berlin

- DIN 52 185 (1976) Prüfung von Holz. Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser. Beuth, Berlin
- DIN 52 186 (1978) Prüfung von Holz. Biegeversuch. Beuth, Berlin
- DIN 52 189-1 (1981) Schlagbiegeversuch. Teil 1: Bestimmung der Bruchschlagarbeit. Beuth, Berlin
- DIN 52 617 (1987) Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. Beuth, Berlin
- EN 1534 (2000) Parkett und andere Holzfußböden: Bestimmung des Eindruckwiderstandes (BRINELL). Prüfmethode. Deutsche Fassung EN, vol 1534-3:2000. Beuth, Berlin
- Ewert M, Scheiding W (2005) Thermoholz in der Anwendung – Eigenschaften und Möglichkeiten. Holztechnologie 46(2):22–29
- Fengel D, Wegener G (2003) Wood—Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Kessel, Remagen
- Finnish ThermoWood Association (2003) ThermoWood Handbook. Verfügbar unter http://www.thermowood.fi/data.php/200312/795460200312311156_tw_handbook.pdf. Abruf: 28 Jan 2009
- Goldstein IS, Jeroski EB, Lund AE, Nielson JF, Weaver JW (1961) Acetylation of wood in lumber thickness. Forest Prod J 8:363–370
- Harzmann LJ (1988) Kurzer Grundriss der allgemeinen Tropenholzkunde. Hirzel, Leipzig
- Homan W (2004) Wood modification—state of the art 2004. Final seminar of COST E18. Paris, France
- Homan W, Jetten J, Sailer M, Slaghek T, Timmermanns J (2007) Bio-switch: a versatile release on command system for wood protection. In: Hill CAS, Jones D, Militz H (Hrsg) Proceedings of the Third European Conference on Wood Modification, Cardiff, UK, pp 301–308
- Illmann G, Schmidt H, Brotz W, Michalczyk G, Payer W, Dietsche W, Hohner G, Wildgruber J (1983) Wachse. In: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Aufl, Bd 24, S 1–49. VCH, Weinheim
- Kollmann F (1951) Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Bd 1. Springer, Berlin
- Krause A (2006) Holzmodifizierung mit *N*-Methylolvernetzern. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Larsson P, Tillman AM (1989) Acetylation of lignocellulosic material. IRG/WP 3516, International Research Group on Wood Preservation, Stockholm, Sweden
- Larsson Breid P (1998) Acetylation of solid wood: wood properties and process development. Department of Forest products and chemical engineering 6, Chalmers University of Technology, Göteborg
- Lohmann U (1991) Holz-Handbuch DRW, Leinfelden-Echterdingen
- Lukowsky D, Lehmann J, Burk R (2002) Vergütetes Kiefernholz für den Fensterbau. Holz-Zentralblatt 128(74):910–911
- Militz H (2002) Thermal treatment of wood: European processes and their background. IRG/WP, vol 40241. International Research Group on Wood Preservation, Stockholm
- Militz H, Beckers EPJ, Homan WJ (1997) Modification of solid wood: Research and practical potential. IRG/WP, vol 40098. International Research Group on Wood Preservation, Stockholm
- Militz H, Mai C (2008) Holzvergütung. In: Wagenführ, A, Scholz, F (Hrsg) Taschenbuch der Holztechnik. Hanser, Leipzig, S 485–500
- Mundigler N, Rettenbacher M (2005) Natwood technology—a material thermal wood modification. In: Militz H, Hill CAS (Hrsg) Proceedings of the Second European Conference on Wood Modification, Göttingen, Germany, pp 270–275
- Nicholas DD, Williams AD (1987) Dimensional stabilization of wood with dimethylol compounds. IRG/WP, vol 3412. International Research Group on Wood Preservation, Stockholm
- Niemz P (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW, Leinfelden-Echterdingen
- Schaffert S (2006) Steuerung und Optimierung von Holzvernetzungsprozessen. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Scheiber C (1965) Tropenhölzer. VEB, Leipzig
- Schneider A (1971) Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlung im Temperaturbereich von 100 bis 200° auf Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit und Bruchschlagarbeit von Kiefern-Splint- und Buchenholz Holz Roh-Werkst 29(11):431–440
- Scheiding W (2007) Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von wachsimprägniertem Thermoholz; Untersuchung der Holzeigenschaften und Ableitung von Einsatzmöglichkeiten. Abschlussbericht: DBU-AZ 22257
- Schmid J, Militz H, Illner M, Schwarz, Stetter A (2006) Einheimisches dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster- und Fassadenbau. Abschlussbericht, Rosenheim
- Scholz G, Krause A, Militz H (2009) Capillary water uptake and mechanical properties of wax soaked Scots Pine. In: Englund F, Hill CAS, Militz H, Segerholm BK (Hrsg) Proceedings of the fourth European conference on wood modification, Stockholm, Sweden, pp 209–212
- Scholz G, Krause A, Militz H (2010) Beeinflussung der Holzfestigkeit durch Wachsträngung. Eingereicht in Holztechnologie, 07 Oktober 2009
- Tjeerdsma BF, Pfeiffer E (2006) Accoya® Holz,-Downloads, Prüfzeugnisse: Janka-Härte von Accoya™-Holz (Berichtscode 6352), Schlagbiegefestigkeit von Accoya™-Holz (Berichtscode 6353). SHR Timber Research Wageningen. <http://accoya.roggemann.de/downloads-68.html>. Abruf 23 Mrz 2009
- Unger A, Schniewind AP, Unger W (2001) Conservation of wood artifacts. Natural Science and Archeology. Springer, Berlin
- Wagenführ R (2000) Holzatlas. Fachbuchverlag, Leipzig
- Wagenführ R, Scheiber C (1989) Holzatlas. VEB, Leipzig
- Welzbacher CR (2007) Verhalten von nach neuen thermischen Modifikationsverfahren behandelter Fichte und Kiefer unter besonderer Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Mikroorganismen. Dissertation, Universität Hamburg
- Windeisen E, Strobel C, Wegener G (2007) Chemical changes during the production of thermo-treated beach wood. Wood Sci Technol 41:523–536