



ZUKUNFT  
H O L Z

Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotentiale

Auszug bestehend aus:  
**Kapitel 08 – Vollholz**



## 8 Vollholz Inhaltsverzeichnis

8.1	Vollholz	
	Holz im Vergleich mit anderen Werkstoffen	S. 539
	Materialmodelle für Holz	S. 545
	Vom Baum zum Bau oder die Quadratur des Kreises	S. 551
	Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz (FPH)	S. 559
	Thermo-hygromechanisches Verformungsverhalten von Pappelholz aus KUP	S. 563
	Mondholz	S. 569
	Holz – die innere Optimierung der Bäume	S. 573
8.2	Modifiziertes Holz	
	Modifizierung von Holz	S. 583
	Acetylierung	S. 587
	Furfurylierung	S. 599
	Melaminharzbehandlung	S. 605
	Holzvernetzung	S. 611
	Siliziumhaltige Verbindungen	S. 619
	Thermische Modifizierung	S. 625
	Modifikation mit holzersetzenen Pilzen	S. 637
	DNA Modifikation von Bäumen	S. 643

## 8 Vollholz Einleitung

In der Praxis sind unterschiedliche Einteilungsordnungen für Baustoffe je nach Zielsetzung und Detaillierung vorzufinden. Ein allgemein gültiges und für alle Zwecke durchgängig anwendbares Ordnungssystem gibt es nicht. Die Unterscheidung nach der stofflichen Zusammensetzung und dem strukturellen Aufbau der Baustoffe eignet sich für eine erste Unterscheidung und Zuordnung. Nach der stofflichen Zusammensetzung werden anorganische und organische Baustoffe unterschieden (Abb. 1).

Anorganische Baustoffe		Organische Baustoffe
mineralische	metallische	
Natursteine, Keramische Baustoffe, Glas, Mörtel, Beton, u.a.	Gußeisen, Stahl, Aluminium, Kupfer, u.a.	Vollholz, Holzwerkstoffe, Bitumen, Teerpeche, Kunststoffe, u.a.

Abb. 1: Baustoffgruppen [www.infoholz.de]

Eine größer werdende Zahl moderner Baustoffe ist als heterogene Mehrkomponenten-Baustoffe zu bezeichnen, die sich in das vorstehende Ordnungssystem nicht immer eindeutig einfügen lassen. Beispiele für solche Bauprodukte sind Stahlbeton, glasfaserverstärkte Kunststoffe, mineralisch gebundene Holzwole-Leichtbauplatten, Kunstharzmörtel und ähnliche. Die Eigenschaften solcher Baustoffe werden nicht mehr durch den Ausgangsstoff, sondern durch ein vielschichtiges Wechselspiel zwischen den Eigenschaften der Reinkomponenten und deren Mengenverhältnis sowie der gegenseitigen Beeinflussung bestimmt.

### Vollholz

Produkte aus Vollholz sind definitionsgemäß solche Holzzeugnisse, die in ihrem Gefüge nicht oder nur wenig verändert wurden. Damit stehen sie im Gegensatz zu den konstruktiven Holzwerkstoffen, die deutlich stärker in ihrem Gefüge verändert sind. Die Bearbeitung von konstruktiven

Vollholzprodukten beschränkt sich auf die Schritte Sägen, Trocknen, Festigkeitssortierung sowie erforderlichenfalls Hobeln, Profilieren, Heraustrennen von Fehlstellen, Keilzinken und Kleben. Die Produkte sind üblicherweise stabförmig und weisen – sofern sie aus mehreren Lagen bestehen – keine Querlagen auf. Allein durch Vergütung des Holzes wie zum Beispiel durch Dämpfen, Trocknen, Imprägnieren oder Verdichten erzeugte Produkte sind keine Holzwerkstoffe.

### Ausgewogenes Eigenschaftsprofil

Vollholz verfügt über ein sehr ausgewogenes Eigenschaftsprofil, wird jedoch in nahezu allen Merkmalen von anderen Materialspezialisten übertroffen. Unumschränkt ist seine Umweltfreundlichkeit, sofern diese nicht durch nachträgliche Behandlungen in Frage gestellt wird. Auch der Preis pro Tonne, bei dem selbst eine thermische Verwertung noch in Betracht gezogen werden kann, ist gegenüber vielen heutigen Materialien konkurrenzlos billig. Das Problem von Vollholz sind seine mechanischen Kennwerte, die je nach Dichte und Wachstumsstruktur um etwa eine Größenordnung streuen. Der Vergleich von Bauholz mit faserparallelem Holz ohne Äste und Wuchsunregelmäßigkeiten fördert nochmals beträchtliche Differenzen zutage, so dass das ungenutzte Festigkeitspotenzial von Vollholz sich insgesamt auf reichlich eine Größenordnung beläuft.

Diese erkennbaren Hemmnisse für eine technische Verwendung von Vollholz beschreibt der Beitrag „Vom Baum zum Bau oder die Quadratur des Kreises“ (Peer Haller). Darunter fällt das kleine Festigkeitsspektrum von Vollholz im Vergleich zu den so genannten Strukturwerkstoffen. Hinzu kommen die Richtungsabhängigkeit des Holzes bezüglich seiner mechanischen Eigenschaften – auch Anisotropie genannt – und eine relativ geringe Dauerhaftigkeit gegenüber der Witterung.

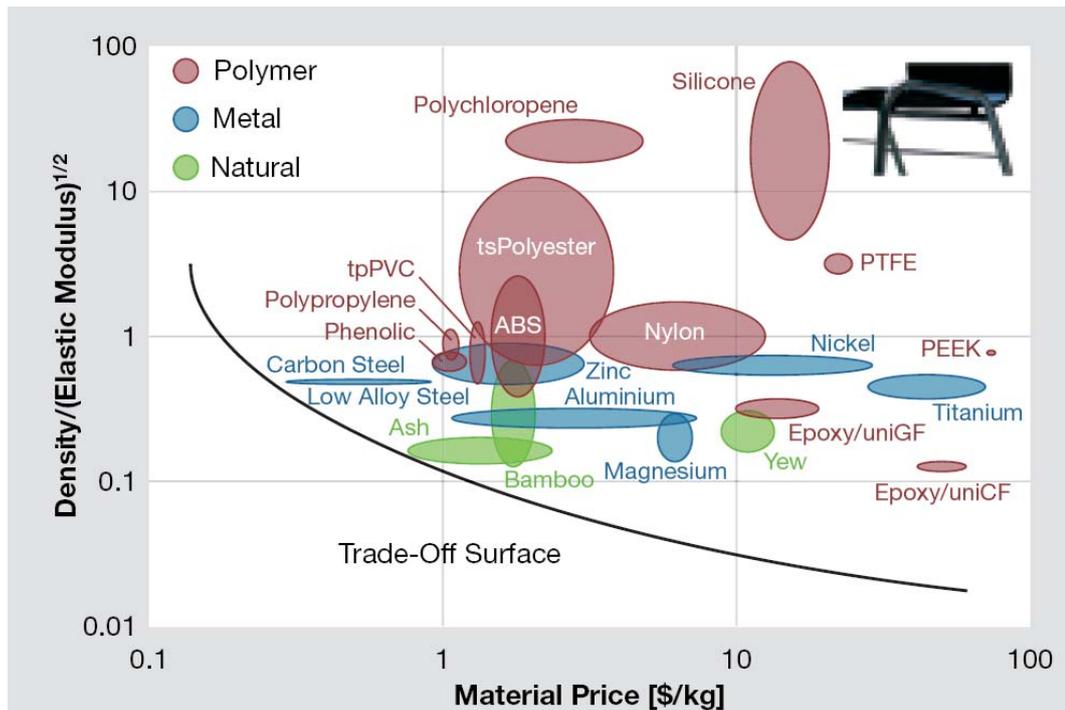


Abb. 2: Trade-off für die Auswahl eines möglichst biegesteifen und leichten Stuhlrahmens in Abhängigkeit vom Materialpreis (nach Ashby 2003).

Trotz dieser Nachteile besitzt Vollholz auch Eigenschaften, die in ihrer Summe einem Werkstoffvergleich durchaus standhalten können. Dies verdeutlicht der Beitrag „Holz im Vergleich zu anderen Werkstoffen“ (Alfred Teischinger), der das Potenzial des Werkstoffes „Vollholz“ im Vergleich zu anderen Werkstoffen zeigt. Das oben stehende Werkstoffdiagramm (Abb. 2) wurde für ein sehr konkretes Beispiel erstellt: Es zeigt die Auswahlkriterien für einen möglichst biegesteifen und leichten Stuhlrahmen in Abhängigkeit vom Materialpreis. Alle in der Nähe der Trade-off-Linie liegenden Werkstoffe sind dafür besonders geeignet, unter anderem auch die Holzart Esche (Ash).

#### Änderung der Holzeigenschaften

Welches Baumaterial genommen wird, entscheidet zumeist der Ingenieur und Planer nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Im

Gegensatz zum Handwerk ist der Ingenieur nicht auf ein bestimmtes Material festgelegt. Eine Entscheidung für Holz im Bauwesen bedarf trotz ökologischer Vorzüge vor allem der Stärkung technischer und wirtschaftlicher Argumente. Naturwissenschaft und Technik sollten daher die Voraussetzungen für eine effiziente Nutzung und stärkere Inanspruchnahme dieser Ressource schaffen. Beispiele dafür finden sich in den nachfolgenden Erläuterungen.

Der Eingriff in seine natürlichen Eigenschaften stellt eine Möglichkeit dar, um Vollholz auch im Bauwesen effizienter nutzen zu können. Der Beitrag „Untersuchung vom thermo-hygro-mechanischen Verformungsverhalten von Pappelholz aus KUP“ (Sonja Ziegler) zeigt, wie der oben aufgeführten Streuung der Festigkeiten von Vollholz wirksam entgegen gearbeitet werden kann. Die Untersuchungen der Pappelhölzer aus Kurzum-

triebsplantagen ergeben eine hervorragende Eignung zur Herstellung von Formholz. Ihre Struktur, geringe Dichte und gleichmäßige Verteilung der Poren sind idealen Voraussetzungen für einen problemlosen technischen Verdichtungs- und Formprozess. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt der Beitrag „Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz (FPH)“ (Peer Haller, Jörg Wehsener) für die Holzart Fichte. Insgesamt sind die gewonnenen Baustoffe um einiges homogener und fester als vergleichbares Vollholz.

Der Beitrag „Mondholz“ (Institut für Holztechnologie) folgt dem Gedanken, Vollholz zu finden, welches eine geringe Streuung seiner Eigenschaften aufweist. Wissenschaftliche Untersuchungen an Hölzern mit bestimmten Fälldatum konnten bisher keine signifikanten Unterschiede zu jenen Hölzern aufweisen, welche ohne besondere Beachtung des Fällzeitpunktes geerntet wurden. Dies schließt jedoch keineswegs aus, dass so genanntes Mondholz – in größeren Dimensionen als Vollholzbalken eingesetzt – tatsächlich deutlich weniger zu Rissen neigt.

### **Modifiziertes Holz**

Ein erheblicher Eingriff in die natürlichen Eigenschaften stellt die Holzmodifizierung dar. In diese Gruppe gliedern sich Hölzer ein, deren chemischer Aufbau der Holzzellen grundsätzlich verändert wurden. Die Veränderung der chemischen Konstitution des Holzes hat die Absicht, verfahrenstechnische Vorteile oder neue Produkte zu gewinnen, welche zum Beispiel die Dauerhaftigkeit des Holzes erhöhen und die ungeschützte Anwendung im Außenbereich ermöglichen.

Der Einsatz von relativ dimensionsstabilen und dauerhaften Importholzarten aus den Tropen und Subtropen sowie die Behandlung wenig dauerhafter Hölzer mit Bioziden waren in der Vergangenheit die Lösungsansätze der Holzwirtschaft, um den natürlichen Nachteilen von Holz entgegenzuwirken.

Allerdings sind in den letzten 20 Jahren sowohl die chemischen Holzschutzmittel mit ihren Wirkstoffen und deren Umweltwirkungen als auch die Bewirtschaftung und der Raubbau der tropischen und subtropischen Wälder in die Diskussion geraten. beschreibt, dass als Folge in manchen Bereichen, wie beispielsweise auf dem Fenstermarkt, eine massive Verdrängung und Substitution des Werkstoffes Holz durch andere Werkstoffe einsetzte.

Dies führte zu verstärkten Aktivitäten seitens der Forschung und Industrie, die Modifizierung einheimischer Hölzer voranzutreiben. Zurzeit ist die thermische und die chemische Modifikation von Holz am Bedeutendsten, da bereits am Markt verfügbar. Noch erforscht werden dagegen die biologische sowie die genetische Modifikation.

Der Beitrag „Modifizierung von Holz“ (Institut für Holzbau) gibt einen tieferen Einblick in die unterschiedlichen Verfahren der Holzmodifikation.

### **Chemische Modifizierung**

Bislang wurden diverse wissenschaftliche Ansätze gewählt, um die Holzzellwand mit chemischen Substanzen zu modifizieren. Bei der chemischen Modifizierung werden vor allem die Hydroxylgruppen in der Zellwand durch funktionelle Gruppen der mit dem Holz reagierenden Chemikalie ersetzt. In dieser Studie werden folgende chemische Modifikationsverfahren in jeweiligen Einzelbeiträgen näher beschrieben: Die Acetylierung, die Furfurylierung, die Behandlung mit Melaminharz, die Holzvernetzung sowie die Behandlung mit siliziumhaltigen Verbindungen.

Ende 2008 wurde in den Niederlanden eine Schwerlastbrücke (siehe Abbildung 3) aus acetyliertem Holz errichtet, welche als Meilenstein für die Nutzung modifizierten Holzes gelten darf. Die prognostizierte Nutzungsdauer der aus neuseeländischer Kiefer bestehenden Brücke liegt ca. bei

80 Jahren. Das Verfahren der Acetylierung beschreibt ein gleichnamiger Beitrag des Instituts für Holzbau. Beim Acetylierungsverfahren werden die Hydroxylgruppen in der Zellwand durch Essigsäureanhydrid in Acetylgruppen überführt. Durch diesen Prozess verändert sich die Fähigkeit des Holzes zur Aufnahme bzw. Abgabe von Wasser, da sich Acetylgruppen im Gegensatz zu Hydroxylgruppen hydrophob (Wasser abweisend) verhalten. Mittlerweise existieren diverse Anlagen zur Acetylierung von Holz, welche auch auf die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens hinweisen.

Die Acetylierung hat allerdings den Nachteil, dass Metallverbinder innerhalb des Holzes von der Essigsäure angegriffen werden. Verwiesen wird in diesem Zusammenhang auf den Beitrag „10.1 Korrosionsverhalten von Baumetallen bei Holzkontakt“ (Beate Gläser, Dirk Kruse, Norbert Rüter). Im Falle der niederländischen Brücke schützt ein Epoxydharz jene Gewindestangen, welche für die Aufgabe der Querkzugbewehrung in das Holz eingeklebt wurden. Auch für die außen liegenden bzw. das Holz berührenden Stahlteile wurden besondere Vorkehrungen getroffen: Sie sind feuerverzinkt und zusätzlich mit einem dreischichtigen Korrosionsschutzanstrich versehen.



Abb. 3: Brücke in Sneek, NL, chemisch modifiziertes Holz ohne konstruktiven Holzschutz

Ähnliche Holzeigenschaften wie bei der Acetylierung erhält man bei der Furfurylierung. Ein entsprechender Beitrag „Furfurylierung“ (Institut für Holzbau) liegt ebenfalls dieser Studie bei. Dieses Verfahren verbessert hauptsächlich die Festigkeitseigenschaften und die Dauerhaftigkeit durch eine erhöhte Dimensionsstabilität und Pilzresistenz. Furfuryliertes Holz ist so gut wie instandhaltungsfrei und zeichnet sich dadurch für den Einsatz im Freien aus. Bei frei bewitterten Hölzern wird von einer Haltbarkeit von 30 Jahren ohne Wartung ausgegangen. Durch die Kombination aus erhöhter Abriebfestigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Meeresorganismen und Meerwasser und seiner dunklen Farbe wird furfuryliertes Holz bereits im Yachtbau eingesetzt. Der Einsatz als Konstruktionsholz beschränkt sich bisher auf den Bau von Schallschutzwänden, Uferbefestigungen u.ä.. Die Verwendung des Holzes für tragende Bauteile ist derzeit allerdings noch nicht bekannt.

Drei weitere Verfahren chemischer Modifikation, die jeweils in einem Beitrag beschrieben werden, beziehen sich auf die Behandlung mit siliziumhaltigen Verbindungen, mit Kunstharz sowie mit Melaminharz. Die Einbringung siliziumhaltiger Verbindungen in das Holz ist derzeit auf Laborversuche begrenzt, jedoch wird an dem Ziel der industriellen Umsetzung gearbeitet. Versuche mit künstlich bewitterten Proben zeigten zwei Effekte: Zum einen wird ein Schutz vor schneller Vergrauung im Außenbereich erreicht, zum anderen wird eine Rissbildung verzögert. Ein anderer Versuch bei behandeltem Kiefernholz zeigte, dass sich der Masseabbau durch Holz zerstörende Pilze um mindestens 60 % gegenüber unbehandeltem Holz verbesserte.

Durch die Behandlung mit Kunstharz wird eine so genannte Holzvernetzung induziert, auch bei diesem Verfahren werden die reaktiven Moleküle der Zellwand hydrophobiert. Versuche mit Buche im Außenbereich stehen allerdings erst am An-

fang. Auch Versuche der Tränkung mit Melaminharz sind noch in den Anfängen: Die Harzbehandlungen zielen dabei auf den kombinierten Effekt, dass sich bei optimierten Prozessbedingungen die Resistenz des Holzes deutlich verbessern lässt und sich zugleich einige andere wichtige Holzeigenschaften wie z.B. Dimensionsstabilität oder Lichtstabilität erhöhen. Proben entsprechend behandelte Kiefer behielten etwa ein Jahr lang ihre ursprüngliche, fällfrisch-helle Farbe. Da jedoch im Außenbereich die Gefahr der erhöhten Rissbildung besteht, wird der Einsatz im Innenbereich, zum Beispiel als Parkett, empfohlen.

#### **Thermische und biologische Modifizierung**

Thermisch modifiziertes Holz wird bei Temperaturen über 160 Grad C hergestellt bei reduzierter Sauerstoffkonzentration. Dadurch ist sie eine Teilpyrolyse in sauerstoffarmer Atmosphäre, die zu einem Abbau der Hemizellulose führt, aber auch zum Abbau der Cellulose- und Ligninbestandteile des Holzes. Mittlerweile liegt für thermisch modifiziertes Holz eine europäische technische Spezifikation vor, die 2008 eingeführt wurde. Diese zeigt auch, wie weit sich mittlerweile die Behandlungsart vor allem im europäischen Raum verbreitet hat.

Ein entsprechender Beitrag des Instituts für Holzbau beschreibt die Einsatzbereiche und Eigenschaften thermisch modifiziertes Holz näher. Danach bietet es sich vor allem als Parkett- und Fußbodenbelag sowohl im Außen- als auch im Innenbereich an. Auf Grund der hohen Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit kann es in Bereichen mit hohen Feuchtwechseln eingesetzt werden. Nach einer Studie der ETH Zürich findet es überwiegend Verwendung im Garten- und Landschaftsbau (52 %) und als Fassadenbekleidung (29 %). Eher gering ist die Verwendung im Innenausbau (7 %), Industriebau (3 %), Möbelbau (3 %), Saunabau (2 %) oder als Fenster und Türen (1 %). Verwiesen sei hier auch auf die Bei-

träge „Verklebung von Thermoholz“ (Thomas Schnider) und „Verklebung von wärmebehandeltem Buchenholz“ (Thomas Schnider, Peter Niemz, Andreas Hurst) in Kapitel 10.

Zuletzt sei als biologische Modifikation von Holz die Änderung der Erbmasse auf Grund genetischer Züchtungen genannt. Der Beitrag „DNA Modifikation von Bäumen“ (Institut für Holzbau) nimmt hierzu näher Stellung. Danach konzentriert sich die Forschung auf die Steigerung der Biomasseproduktion und Veränderungen der Holzstruktur, um im Wesentlichen die Ligninzusammensetzung und den Ligningehalt des Holzes - was insbesondere für die Papierindustrie interessant ist - zu beeinflussen. Vor allem die schnell wachsende Pappel ist im Fokus der Forschung, das Produktionsziel ist vor allem die Zellstoffherstellung, weniger der Einsatz als Bauholz.

Insgesamt zeigen die teilweise bereits großtechnisch realisierten Verfahren der Holzmodifikation, dass man innerhalb der letzten 20 Jahre in Deutschland und Europa dem Verzicht sowohl auf chemische Holzschutzmittel als auch auf tropische Hölzer ein gutes Stück näher gekommen ist. In Bezug auf die deutlich verbesserten Festigkeiten und Dauerhaftigkeiten ist dem modifizierten Holz auch im Baubereich ein hohes Entwicklungspotenzial zu bescheinigen, das es durch praxisnahe Forschung weiterhin zu unterstützen gilt.



## 8.1 Vollholz

### Holz im Vergleich mit anderen Werkstoffen

#### Alfred Teischinger

Holz zählt zu den vielseitigsten einsetzbaren Bau- und Werkstoffen und entfaltet somit in der Gesamtheit seiner Eigenschaften einen Werkstoff der Superlative. In einzelnen Kennwerten bzw. Anwendungen liegt Holz jedoch oftmals weit hinter den konkurrierenden Werkstoffen zurück, weshalb es selbst in typischen Anwendungsbereichen durch moderne synthetische Werkstoffe substituiert wird. Durch die Entwicklung moderner und innovativer Holzwerkstoffe kommt es gleichzeitig wieder zu einer teilweisen Rücksubstitution. In Werkstoffdiagrammen nach Ashby kann für bestimmte Zielfunktionen der optimale Werkstoff identifiziert werden und es wird gezeigt, wo Holz sein Potenzial zur vollen Entfaltung bringt.

#### 1 Einleitung

Eine historische Betrachtung der Nutzung von Werkstoffen zeigt, dass sich im Zuge der technologischen Entwicklung einer Gesellschaft die Bedeutung einzelner Werkstoffe oft dramatisch verändert hat. Gerade am Beispiel des Baustoffes Holz zeigt sich, dass seine relative Bedeutung als Baustoff für tragende Zwecke im Vergleich zu den anderen Baustoffen in den letzten Jahrhunderten stark zurückgegangen ist. Erst in allerjüngster Zeit, zeigt sich aufgrund holztechnologischer Innovationen und der steigenden Bedeutung nachwachsender Rohstoffe wieder eine deutliche Steigerung des Einsatzes von Holz und damit auch eine Rücksubstitution des Werkstoffes für bestimmte Einsatzbereiche. Ein günstiges Preis-/Leistungsverhältnis spielt dabei nach wie vor eine entscheidende Rolle.

Es gibt verschiedene Zugangsweisen, Bau- und Werkstoffe miteinander zu vergleichen. Das Problem dabei ist, dass in der Regel nur eindimensionale Bezugsgrößen bzw. Vergleiche angestellt werden wie Materialpreis pro Masse oder Volu-

men. Wesentlich komplexer fällt der Vergleich aus, wenn eine bestimmte Funktion oder Leistung angesprochen wird, wie zum Beispiel eine bestimmte Festigkeit, Steifigkeit, Wärmedämmung etc. Aus dem täglichen Umgang mit den Werkstoffen, ihrer Verbesserung oder gar Neuentwicklung (Stichwort Kunststoffe etc.) haben die einzelnen Werkstoffgruppen wie metallische Werkstoffe, mineralische Werkstoffe und Glas, Kunststoffe, natürliche Werkstoffe wie Holz etc. ihren Platz für bestimmte Einsatzzwecke gefunden. Durch Verbesserungen und Neuerfindungen von Werkstoffen bzw. Werkstoffverbunden kommt es laufend zu Substitutionen von Werkstoffen (z.B. Glasflasche durch PET-Flasche oder Tetra Pak, Holzrahmen bei Stühlen durch Leichtmetallrahmen, Fensterrahmen aus Holz durch Kunststoff bzw. Holz-Alu-Verbunde etc.).

Die Substitutionsvorgänge können dabei unterschiedlich schnell verlaufen. Der Substitutionsvorgang des konventionellen Fensterrahmens aus Holz verläuft vergleichsweise langsam gegenüber der Substitution des Glas- oder Metallgebindes aus PET oder des Karton-, Kunststoff- und Metallverbundes (Tetra Pak) bei einer Vielzahl von Getränkearten.

#### 2 Die globale Bedeutung einzelner Werkstoffe

Aus globaler Sicht betrachtet sind Holz und Holzwerkstoffe nach wie vor von entscheidender Bedeutung für die Materialbereitstellung der einzelnen Gesellschaften (Tab. 1). Mit der wachsenden Weltbevölkerung auf eine geschätzte Zahl von ca. 9 Milliarden Menschen im Jahr 2040, dem zunehmenden Wohlstand und Nachholbedarf der Menschen in den Schwellenländern, kommt es sowohl beim Energiebedarf wie auch beim weltweiten Materialbedarf zu hohen Zuwachsraten, wobei derzeit vor allem Stahl, Zement, Aluminium wie auch Kunststoffe überproportionale Zuwachsraten haben, die teilweise nur durch ent-

sprechend hohe Recyclingraten abgedeckt werden können (Tab. 1). Der Werkstoff Holz gerät neben einer derzeit eher bescheidenen Recyclingquote zunehmend in ein Spannungsfeld von stofflicher und energetischer Nutzung sowie zumindest regional limitierter Verfügbarkeit, worauf seitens der Holzwirtschaft schon jetzt durch vorausschauende strategische Nutzungskreisläufe reagiert werden müsste [6, 7, 8].

### 3 Methoden eines allgemeinen Werkstoffvergleiches

Es ist nicht immer ganz einfach, Werkstoffe miteinander zu vergleichen und daraus dann eine Entscheidung für den Einsatz eines bestimmten Werkstoffes abzuleiten. Dies hängt auch davon ab, auf welcher Ebene man die Werkstoffe untereinander vergleichen will. Eine generelle Struktur für die Bewertung von Werkstoffen bietet (Abb. 1), in dem werkstoffspezifische Eigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit, Dichte, Wärmeleitfähigkeit etc.) und attributive Eigenschaften wie Verfügbarkeit, Preis, Verarbeitungseigenschaften etc. unterschieden werden. Zusätzlich wird eine ökologische Bewertung der Werkstoffe immer wichtiger, die für die Werkstoffauswahl letztendlich von der jeweiligen gesellschaftlichen Verantwortung und deren Standards abhängt. Diesbezügliche Aktivitäten im CEN TC 350, generelle Standards für die ökologische Bewertung von Baustoffen zu erarbeiten gehen in die richtige Richtung.

Will man Werkstoffe für einen speziellen Einsatz bewerten, dann eignen sich die Werkstoffdiagramme von Ashby (2003) für eine erste Abschätzung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Werkstoffe. Dabei können entweder bestimmte Zielfunktionen gebildet werden (z.B. eine höchstmögliche Säule, Abb. 2) oder ein Trade-off (leichtester und dennoch biegesteifer Stuhlrahmen bei entsprechender Kostenbetrachtung, Abb. 3), um

Tab.1: Jährliche globale Produktion verschiedener Werkstoffe mit aktuellen Recyclingraten sowie Wachstumsraten [[4] sowie verschiedenen Internetquellen]

	Produktion Mt/Jahr	Recyclingrate	Wachstumsrate <sup>1)</sup>
Rundholz (stofflich genutzt)	1 352	n.i.	n.i.
Schnittholz und Holzwerkstoffe	450	WE 13%	2,5 %
Papier und Karton	480	WE 63%, US 53%, WW 37%	2,7%
Kunststoffe	280	WE 35%, 54% rsp.	6,3%
Zement	2 290	n.i.	4,3%
Rohstahl	1240	WW 42%	6 – 9%
Aluminium	32	WE 34%, US 45%	7%
Glas	137	WE 64%	n.i.

WE Westeuropa, WW Weltweit, US United States of America

1) Die angeführten Wachstumsraten beziehen sich auf Statistiken für den Zeitraum 2005 – 2007. Durch die aktuelle weltweite Wirtschaftskrise sind diese Wachstumsraten für bestimmte Werkstoffgruppen derzeit deutlich geringer

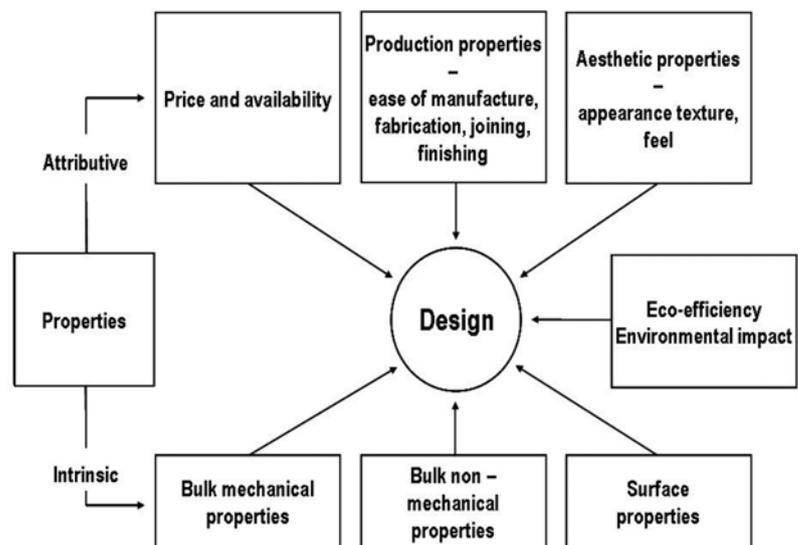


Abb. 1: Struktur der Werkstoffauswahl für ein Productdesign [3]

ein Materialscreening durchzuführen. Das eher theoretisch anmutende Beispiel einer höchst möglichen Säule (Abb. 2) ist durch die Funktion  $E/\rho^2 = \text{const.}$  bestimmt und zeigt die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe in Hinblick auf ihre Steifigkeit im Verhältnis zur Dichte. Holz nimmt dabei eine überragend gute Stellung ein.

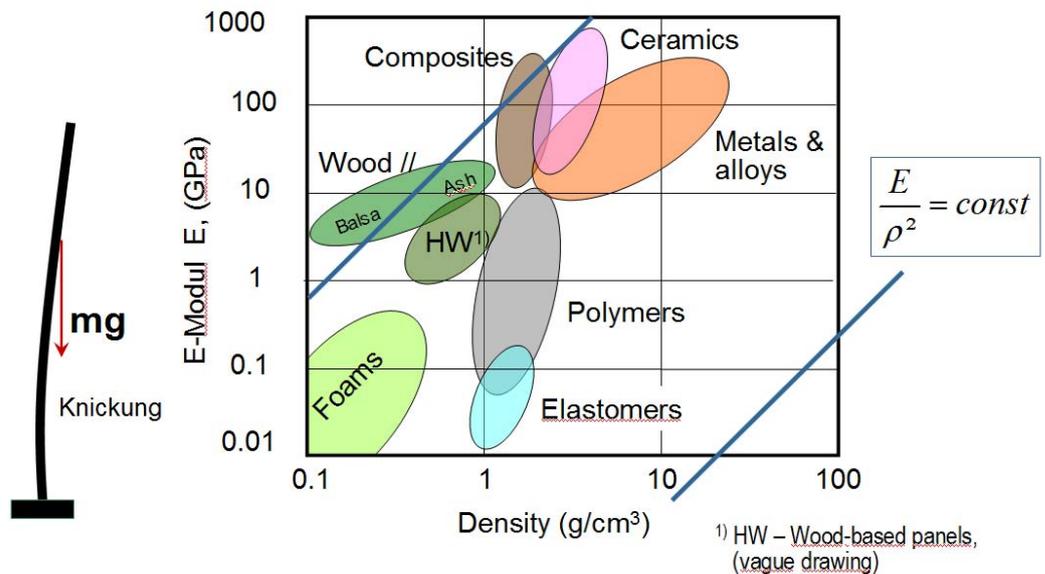


Abb. 2: Werkstoffauswahl für eine bestimmte Zielfunktion (im vorliegenden Beispiel: höchstmögliche Säule) [2]

Alle Werkstoffe, die auf der nach der Gleichung  $E/\rho^2 = const.$  generierten Funktion (hier blaue Linie) liegen, zeigen für diesen Fall dieselbe Eigenschaft.

Diese Werkstoffdiagramme von Ashby können nach bestimmten Zielfunktionen, unter anderem auch nach der Kostenstruktur der einzelnen Werkstoffe oder für eine bestimmte Zielfunktion (zum Beispiel biegesteifer und möglichst leichter Rahmen) aufgelöst werden.

Im Sinne eines ökologischen Vergleiches ist zwar durch den ISO Standard 14044 die Methode der Ökobilanzierung von Produkten standardisiert,

dennoch ergeben sich bei der Bewertung und dem Vergleich von Baustoffen, Bauteilen und den daraus erzeugten Bauwerken noch große Unsicherheiten in einer allgemein anerkannten vergleichenden Bewertung. Gerade für den Baustoff Holz liegen jedoch bereits eine Vielzahl von Studien und Kenndaten auf Basis von Ökobilanzen usw. vor [1]. Dabei steht fest, dass der Baustoff Holz nicht nur in seiner Herstellung im Vergleich zu anderen Baustoffen deutlich weniger Energie benötigt (und damit  $CO_2$  frei setzt), sondern dass die stoffliche Nutzung von Holz über einen möglichst langen Zeitraum eine effektive Kohlenstoffsenke darstellt. (Abb. 3 und 4)

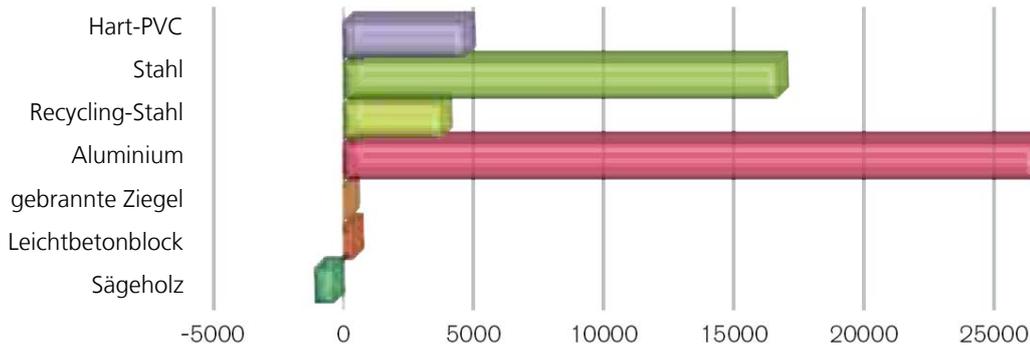


Abb. 3: Vergleich des CO<sub>2</sub> Ausstoßes verschiedener Werkstoffe als Nettoemissionen (CO<sub>2</sub> äquivalente Emissionen) einschließlich des Kohlenstoffsenkeneffekts. Nach RTS-Umweltbericht über Baustoffe 2000 – 2001, übernommen [1]

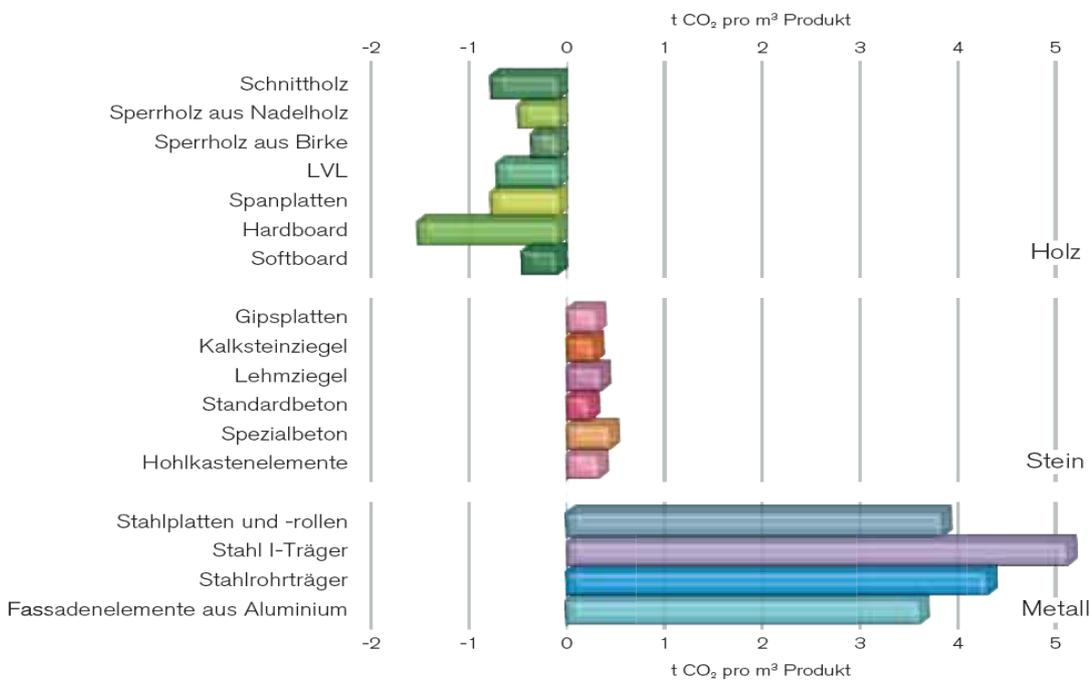


Abb. 4: Netto CO<sub>2</sub> Emissionen von Baustoffen während der gesamten Nutzungsdauer. Nach RTS Building Information Foundation, [1]



## Quellen

- [1] Dem Klimawandel mit Holz entgegen. CEI Bois, Brüssel. [www.cei-bois.org](http://www.cei-bois.org)
- [2] Ashby, M.F. 2003: Materials selection in mechanical design. Butterworth Heinemann, Oxford, 2003
- [3] Ashby, M.F., Jones D.R.H., 2005: Engineering Materials 1. An introduction to properties, applications and design. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford
- [4] Dewulf, J., Van Langenhove, H., 2006: Renewables-Based Technologies. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester 2006
- [5] Gallis, C. (ed.), 2007: 3<sup>rd</sup> European COST E31 Conference. Management of Recovered Wood. Proceedings, Klagenfurt, Austria 2007, University Studio Press, Thessaloniki
- [6] Teischinger, A., Müller, U., 2007: Ressourcenverknappung in der Holzwirtschaft als Herausforderung für Technologie und Innovation. LIGNOVISIONEN Band 16, Universität für Bodenkultur Wien, ISSN 1681-2808
- [7] Teischinger, A., 2007: Wood and competing materials. In: IUFRO & The Chinese Forest Products Assoc., Eds., IUFRO, All Division 5 Conference, Forest Products and Environment: A Productive Symbiosis, IUFRO Vienna, IUFRO All Division 5 Conference. Forest Products and Environment: A Productive Symbiosis, October 29th - November 2nd, 2007, Taipei, Taiwan, 10-12
- [8] Teischinger, A., 2008: Werkstoffvergleich Holz. In: Schweizer Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung/SAH (Hrsg.), Holzforschung Schweiz, SAH c/o LIGNUM, Zürich, SAH Statusseminar, 19.03.2008, EMPA Akademie, Duebendorf, 1-3; ISSN 1662-6168

## 8.1 Vollholz

### Materialmodelle für Holz

**Thomas Tannert, Till Vallée**

#### **Einführung**

Im traditionellen Holzbau kamen nur stabförmige Tragelemente für die Aufnahme von Normalkräften oder Biegemomenten zum Einsatz, für die universell einsetzbare analytische Berechnungsverfahren verfügbar sind. Zahlreiche im modernen konstruktiven Holzbau eingesetzte Werkstoffe (Brettschichtholz, Schichtholz, Brettstapel) ermöglichen flächige Bauteile und beliebig gefügte Querschnitte (T-, I- Hohlkasten, blockverleimte Querschnitte). Für diese in zunehmendem Maße eingesetzten zweidimensionalen Tragelemente sind zur Berechnung des Spannungen und Deformationen nicht immer analytische Verfahren vorhanden, sondern es müssen numerische Methoden eingesetzt werden. Auch im Bereich von Verbindungsmitteln und immer komplexer werdenden Anschlüssen treten mehrdimensionale Beanspruchungszustände und Spannungsspitzen auf, welche den Einsatz numerischer Verfahren erfordern.

Um Aussagen über das Tragverhalten von solchen Bauteilen treffen zu können, müssen Materialmodelle formuliert werden, welche das reale physikalische Verhalten von Werkstoffen auch über die Grenzen der Elastizitätstheorie hinaus beschreiben. Schnittgrößen und Verschiebungen ausschließlich nach der linearen Elastizitätstheorie zu bestimmen ist oft unbefriedigend, da die Berücksichtigung der plastischen Verformbarkeit zu duktilen und wirtschaftlicheren Tragwerken führen kann. Grundlage für die Anwendung numerischer Verfahren sind geeignete Materialmodelle, welche das Trag-, Verformungs-, Bruch- und Nachbruchverhalten von mehrachsigen beanspruchten Bauteilen zuverlässig beschreiben. Die Defizite an werkstoffmechanischem Grundlagenwissen im Hinblick auf das Verhalten von Holz bei komplexen Beanspruchungen begründete die Forschung zur Erweiterung des Materialverständnis-

ses von Holz und seiner mathematischen Beschreibung, unter anderen an der TU Wien [1–6], der Bauhaus-Universität Weimar [7–8] und der Universität Leipzig [9–10].

#### **Grundlagen zur Materialmodellierung**

Numerische Methoden führen zu Näherungslösungen von analytischen Problemen, für die mittels analytischer Ansätze keine Lösungen formuliert werden können. Es gibt verschiedene numerische Methoden, unter anderem die Finite Elemente Methode (FEM), Finite Differenzen Methode, Diskrete Elemente Methode und Material Punkt Methode [11],[12]. Jede dieser Methoden hat Vor- und Nachteile, auf die hier nicht eingegangen werden kann. Die FEM ist die am weitesten verbreitete Methode um das Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen rechnerisch zu beschreiben; diese Methode bietet die Möglichkeit, die Anzahl von Versuchen zu reduzieren, und nach Anschluss der experimentellen Modellkalibrierung und Verifizierung können Last-, Lager- und Randbedingungen im Modell variiert werden.

Ein Materialgesetz verknüpft Spannungen mit Verformungen und ist damit die Grundlage der Berechnung der Verformung von Körpern. Materialgesetze werden unterteilt nach der Dimension des Spannungszustands den sie beschreiben (1D, 2D oder 3D) und danach, welchen Spannungs-Dehnungs-Verlauf bei Be- und Entlastung das Material aufweist. Ist ein Materialgesetz ideal elastisch und linear, so spricht man von linear ideal elastischen Verhalten; diese ideale Elastizität gilt nur in gewissen, technisch nutzbaren Bereichen. Eine Abweichung von diesem Zusammenhang kann z.B. durch Überschreiten der Elastizitätsgrenze bei mechanischer Beanspruchung hervorgerufen werden.

Für Holz gilt unabhängig von der Beanspruchungsart oder -richtung, dass nach Überschrei-

tung einer Elastizitätsgrenze bleibende Schädigungen auftreten. Bei verschiedenen Beanspruchungsmodi ist im postkritischen Bereich eine Entfestigung zu verzeichnen, die mit Mitteln der Kontinuumsmechanik auf Grundlage der Plastizitätstheorie berücksichtigt werden kann. Holz besitzt weiterhin ein ausgeprägtes zeit- und feuchteabhängiges Verhalten, bei dem sowohl verzögert elastische als auch irreversible Verformungen auftreten. Bei Vernachlässigung von Temperatureinflüssen sowie zeitabhängigen Eigenschaften reduzieren sich die unter einer einwirkenden Belastung resultierenden Dehnungen des Materials auf einen elastischen sowie unmittelbar auftretenden plastischen Anteil: Während der elastische Anteil relativ einfach berechnet werden kann, existieren gemäss Plastizitätstheorie drei konstitutive Beziehungen, mit deren Hilfe das irreversible Festigkeitsverhalten von realen Stoffen mathematisch beschrieben wird: (i) Fließkriterium, (ii) Fließregel und (iii) Verfestigungsvorschrift.

### Holz als Roh- und Werkstoff

Holz ist ein inhomogener und anisotroper Werkstoff. Seine mechanischen Eigenschaften werden vorwiegend durch die Holzart, Rohdichte und Holzfeuchte bestimmt. Holz ist ferner mit makroskopischen Inhomogenitäten, wie Ästen, Rissen und Faserabweichungen, durchzogen. Diese beeinflussen nachhaltig und oftmals nachteilig die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. In den meisten Modellen werden derartige Inhomogenitäten jedoch vernachlässigt und es wird von makroskopisch homogenem Material ausgegangen. Alternativ können basierend auf der klassischen Kontinuumsmechanik sowohl die mechanischen Eigenschaften des Materials als auch Inhomogenitäten verschmiert werden. Mit diesem Ansatz wird z.B. ein Riss oder eine andere Materialdiskontinuität nicht diskret abgebildet, sondern durch seine Auswirkung auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten beschrieben.

Holz wird durch materielle Eigenschaften über einen Abschnitt der Längenskala beeinflusst, der sich von den makroskopischen Wachstumseigenschaften bis zum molekularen Niveau erstreckt [13]. Es können fünf Skalen unterschieden werden: (i) makroskopische Skala, (ii) Jahrringskala, (iii) Zellstruktur, (iv) Zellwandebene, und (v) Molekülebene [2]. Die komplexe Struktur erfordert für eine umfassende Beschreibung des Materialverhaltens eine Anpassung an die betrachtete Größenordnung. Die durch den zellulären Bau bedingten anatomischen Unterschiede in Faser-, Radial- und Tangentialrichtung spiegeln sich prinzipiell in den elastischen Eigenschaften des Holzes [14].

Auf makroskopischer Ebene wird meist orthotropes Verhalten bezüglich der natürlichen Achsen des Holzes unterstellt. In diesen Achsen longitudinal (L) zum Stamm, radial (R) und tangential (T) zu den Jahresringen sind nicht nur die Steifigkeitsverhältnisse sondern auch die Bruchfestigkeiten, Versagensmechanismen und Festigkeitsdegradationen stark unterschiedlich. Das allgemeine Elastizitätsgesetz für den 3-achsigen Fall kann für die Annahme der Orthotropie vereinfacht werden, so dass neun unabhängige Parameter durch Materialprüfung bestimmt werden müssen: die Elastizitätsmoduli in den Materialrichtungen (L, R, T), die Schubmoduli in den Ebenen (LR, LT, RT) und die drei zugehörigen Querdehnzahlen. Während die Anzahl vorhandener Tests Sicherheit über die Elastizitätsmoduli geben, existiert weniger Sicherheit über die Schubmoduli und die Querdehnzahlen.

Der Schlüssel zum erfolgreichen Modellieren ist eine realitätsnahe Beschreibung des Materialverhaltens. Meist werden einzelne Phänomene des materiellen Verhaltens des Holzes ohne ihre Interaktion studiert. Idealerweise sollten folgende Parameter gemeinsam berücksichtigt werden: (i) biologische Parameter wie Holzart; (ii) physikali-

sche Parameter wie Rohdichte, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Feuchtegehalt; und (iii) strukturelle Parameter wie Faserorientierung, lokale Defekte und Schädigungen [1]. Numerische Modellierungen der Tragfähigkeit von Holz werden hauptsächlich auf der Makroebene durchgeführt. Eine genaue Kenntnis der Holzstruktur auf Mikroebene ist nur im Einzelfall möglich und die Ergebnisse einer solchen Modellierung können nicht verallgemeinert werden. Allgemeingültige Materialmodelle für Holz sollten in der Lage sein, die skalaren Effekte einzubeziehen [13]. Die Betrachtung von Holz auf makroskopischer Skala als homogenes, zylindrisch-orthotropes Material ist oftmals unzulänglich ist, da die strukturellen Eigenschaften wie Dichte und Jahrringlage das Bruchverhalten stark beeinflussen [2].

#### **Bruchhypothesen für Holz**

Die Kenntnis der Materialfestigkeiten ist notwendig um mit einem mathematischen Materialmodell eine Aussage über die Tragfähigkeit von Elementen zu treffen. Die Bestimmung von Festigkeiten unter einachsiger Beanspruchung ist relativ einfach möglich und somit auch die Bestimmung der Tragfähigkeit von Bauelementen unter einachsiger Beanspruchung. In Realität treten jedoch meist mehrachsige Spannungszustände auf. Die Bestimmung von Festigkeiten unter mehrachsiger Beanspruchung kann sehr aufwendig an speziellen Versuchseinrichtungen durchgeführt werden [1]; Die experimentelle Bestimmung eines einfachen 2d Konstitutiv-Gesetz muss nicht immer aufwendig sein, einfache „Off-axis“ Zugversuche, bei denen die Fasern verschiedene Neigungen zur Kraft aufwiesen ermöglichen es, neben der Festigkeit parallel und senkrecht zu den Fasern auch dessen Schubfestigkeit zu bestimmen.

Um eine Aussage über die Tragfähigkeit von Bauteilen unter mehrachsigen Spannungszuständen treffen zu können bedarf es einer adäquaten Bruchhypothese. Bruchkriterien sind empirischer

Natur, oft aus experimentellen Daten des Materialverhaltens entwickelt. Für Holz wurde eine Reihe von Bruchhypothesen entwickelt und angewandt [15]. Die meisten im Holzbau verwendeten Bruchkriterien sind Abwandlungen des Tsai-Wu Tensorpolynoms [16]. Diese Kriterien unterscheiden allerdings nicht die materialspezifischen Bruchmechanismen bei Druck- bzw. Zugbeanspruchung oder entsprechend der Faserorientierung. Folglich ist es mit diesem Ansatz nicht möglich, die an den Beanspruchungsmodus gebundenen Ver- oder Entfestigungen abzubilden. Auch die unsichere Beurteilung unzulässiger Spannungszustände bei großen Lastinkrementen und die große Anzahl willkürlicher Festigkeitskoeffizienten mathematischer Natur sprechen gegen eine Verwendung der Tensorpolynomtheorie als Grundlage für ein allgemein gültiges Holzmodell. Die Formulierung einzelner, voneinander unabhängiger Fließkriterien, obwohl hinsichtlich der numerischen Umsetzung allerdings aufwändiger als geschlossene Funktionen, erlaubt indes eine treffende Beschreibung der holzspezifischen Versagensmechanismen.

#### **Mehrflächenplastizitätsmodell**

Auf Grund des charakteristischen makroskopischen Aufbaus sind die mechanischen Eigenschaften von Holz richtungs- und beanspruchungsabhängig. Holz zeigt bei Längs- und Querszug- sowie Längsschubbeanspruchung ein sprödes Versagen infolge von Rissbildung. Dagegen ist das Verhalten bei transversaler und longitudinaler Druckbeanspruchung ausgesprochen duktil. Weiterhin bestehen Interaktionen von mehreren räumlichen Spannungskomponenten mit Einfluss auf das Materialverhalten. Für eine sinnvolle numerische Formulierung müssen bei Interaktion die Entfestigungen miteinander gekoppelt werden. Andererseits kann eine Interaktion zwischen Spannungszuständen ausgeschlossen werden, wenn durch die Beanspruchungen verschiedene Ebenen der Holzsubstanz geschädigt werden

oder die Versagensmechanismen unabhängig voneinander ablaufen.

Mehrflächenplastizitätsmodelle ermöglichen die Unterscheidung der mikromechanischen Brucharten. Grosse [7] entwickelte ein Modell für quasi-statisches Kurzzeittragverhalten, welches Interaktionen zwischen Querspannung, Längs- und Rollschub in den LT und LR Ebenen und zwischen Längsschub in der LR Ebene und Querdruck berücksichtigt. Die spezifischen Entfestigungsphänomene finden größtenteils in verschiedenen Ebenen der Mikrostruktur statt und laufen unabhängig voneinander ab; auf makroskopischer Ebene breiten sich Risse oder Stauchbänder nur ausgerichtet zu den natürlichen Symmetrieebenen aus und eine Interaktion ist nur zwischen den Schubspannungen und einer transversalen Beanspruchung möglich. Das vorgeschlagene mehrflächige Fließkriterium enthält sechs Bedingungen: (i) Faserruptur, (ii) Faserstauchung, (iii) Rissbildung parallel zur LT-Ebene, (iv) radiale Kompression, (v) Rissbildung parallel zur LR-Ebene und (vi) tangentielle Kompression.

Aufbauend auf den biaxialen Versuchen von Eberhardsteiner [1], die das mathematische Modell und eine quantitative Grundlage als auch eine qualitative Basis liefern, schlagen Mackenzie-Helnwein et al. [3] ein weiteres Mehrflächenplastizitätsmodell vor. Je nach Beanspruchungsart werden vier Grundtypen von unterschiedlichen Versagensmechanismen aufgezeigt: (i) sprödes Zugversagen in Faserrichtung mit kaskadenartigem Splitterbruch, (ii) sprödes Versagen durch kombinierte Zug- und Schubbeanspruchung quer zur Faser mit glattem, dem Faserverlauf folgenden Bruch, (iii) duktiles Druckversagen quer zur Faser mit ausgeprägtem Verdichtungs- und Verfestigungsverhalten, und (iv) Druckversagen in Faserrichtung unter Ausbildung von lokalen bandartigen Schädigungszonen.

Eine Erweiterung des Plastizitätsmodells von Mackenzie-Helnwein et al. um die Berücksichtigung von Holzmerkmalen wurde durch Fleischmann [4] vorgeschlagen. Die Einbeziehung der Faserneigung ist durch die Verwendung eines orthotropen Materialmodells ohne zusätzliche Maßnahmen möglich. Der Einfluss von Ästen und der damit verbundenen lokalen Faserabweichungen auf das mechanische Verhalten kann über einen dimensionslosen Astfaktor definiert werden. Der Einfluss von Ästen und der lokalen Faserabweichungen um die Äste auf die Steifigkeitseigenschaften wird deshalb vernachlässigt; die Auswirkung lokaler Störungen auf die Festigkeitseigenschaften ist dagegen beträchtlich und wird durch Verändern der initialen Fließfläche für fehlerfreies Fichtenholz über eine Abminderung der ins Modell eingehenden Extremwerte der Fließspannungen in Abhängigkeit vom Astparameter berücksichtigt [6].

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Mit den entwickelten Materialmodellen, die im vorherigen Abschnitt skizziert wurden, stehen leistungsfähige Werkzeuge für die numerische Simulation von Holz zur Verfügung mit denen sich eine Vielzahl von baupraktischen Aufgabenstellungen untersuchen lassen. Sie wurden unter anderem erfolgreich bei Holz-Beton-Verbundsystemen und Schalenkonstruktionen eingesetzt, Problemstellungen bei denen mit herkömmlichen Materialbetrachtungen für Holz nur wenig realistische Ergebnisse zu erwarten sind. Der Einsatz leistungsfähiger Materialmodelle, die das orthotrope und nicht-elastische Verhalten von Holz in einer dreidimensionalen Formulierung berücksichtigen, ermöglicht Einblicke in die Spannungsverteilung, die aktivierten Versagensmechanismen und das Ausmaß plastischer Verformungen. Die Ergebnisse von numerischen Simulationen eröffnen neue Wege in der Bemessung und Optimierung von Bauteilen. Die entwickelten Materialmodelle können für viele im Holzbau denkbare Prob-

lemstellungen eingesetzt werden, so z.B. für Ausklinkungen, Durchbrüche, Queranschlüsse, zimmermannsmäßige oder geklebte Anschlüsse.

Die bisher entwickelten Materialmodelle sind für quasistatische Kurzzeitbelastung gültig. Für Weiterentwicklungen kommt der Einbeziehung des hygrothermischen Langzeittragverhaltens große Bedeutung zu. Zu klären ist, wie sich Fehlstellen im Material auf die Festigkeitsentwicklung im postkritischen Bereich und unter lang anhaltenden und wechselnden Belastungen auswirken. Mit Mehrflächenplastizitätsmodellen können die unterschiedlichen Versagensmechanismen durch verschiedene, mikromechanisch motivierte Versagensflächen berücksichtigt werden und damit das Materialverhalten für nicht getestete Beanspruchungszustände abgeschätzt werden. Eine Extrapolation auf das Verhalten von nicht getesteten Holzproben und -arten ist jedoch nicht möglich, da die Zusammenhänge zwischen der Mikrostruktur und dem mechanischen Verhalten des Materials keinen Eingang finden. Mit dem Plastizitätsmodell kann also die große Variationsbreite mechanischer Kennwerte unterschiedlicher Holzarten und -proben anhand deren unterschiedlicher mikrostruktureller Kennwerte nicht erklärt werden. Kern des zuletzt genannten Modells ist die Identifizierung universeller Grundbausteine und morphologischer Strukturen in Holz. Mikromechanische Modelle stellen eine Ergänzung zu Plastizitätsmodellen dar, indem sie die Ermittlung von Eingabedaten für diese Modelle in Abhängigkeit von mikrostrukturellen Kenngrößen ermöglichen [5].

Um Effekte, die durch Querdehnungsbehinderung (z.B. in blockverleimten Brettschichtholz durch ungleichmäßige Feuchteänderungen) entstehen, numerisch abbilden zu können, ist es notwendig die plastischen Dehnungen transversal zur Belastungsrichtung zu erfassen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Weiterentwicklung vorhandener Messtechnik, um aus Laborversuchen und Tragwerkuntersuchungen mehr Informationen über den Verformungszustand gewinnen zu können. Eine Aussage über die Resttragfähigkeit geschädigter Bauteile ist zurzeit mit numerischen Methoden noch nicht möglich. Dafür müssten die Materialkennwerte von geschädigtem Holz und die Zusammenhänge der Ergebnisse zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden mit den Kennwerten des Materialmodells bestimmt werden. Abschliessend ist zu bemerken, dass die bisher entwickelten Materialmodelle nicht in kommerziell erhältlicher Software implementiert sind. Dies ist aber eine unabdingbare Voraussetzung zur Verbreitung und Anwendung der Materialmodelle.

## Quellen

- [1] J. Eberhardsteiner. Mechanisches Verhalten von Fichtenholz – Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften. Springer Verlag, Wien New York, 2002.
- [2] K. Frühmann. Fracture of wood on different hierarchical levels. Dissertation, TU Wien, 2002.
- [3] P. Mackenzie-Helnwein, J. Eberhardsteiner, H.A. Mang. A multi-surface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis. *Computational Mechanics* 31: 204-218, 2003.
- [4] M. Fleischmann. Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines realitätsnahen orthotropen elastoplastischen Werkstoffmodells. Dissertation, TU Wien, 2005.
- [5] K. Hofstetter, Ch. Hellmich, J. Eberhardsteiner. Development and experimental validation of a continuum micromechanics model for the elasticity of wood. *European Journal of Mechanics A-Solids* 24: 1030-1053, 2005.
- [6] J. Eberhardsteiner, K. Hofstetter. Materialgesetze für Holz – Unerlässlich für die Bewertung und Prognose des Verhaltens von Holz und Holzkonstruktionen. Beitrag zum 12. Internationales Holzbau-Forum, 2006.
- [7] M. Grosse. Zur numerischen Simulation des physikalisch nichtlinearen Kurzzeittragverhaltens von Nadelholz am Beispiel von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, Dissertation, Bauhaus Universität Weimar, 2005.
- [8] M. Grosse, K. Rautenstrauch. Numerical modelling of timber and fasteners used in timber-concrete-composite constructions. *Proceedings, CIB-W18*, 37-7-16, 2004.
- [9] J. Schmidt, M. Kaliske. Zur dreidimensionalen Materialmodellierung von Fichtenholz mittels eines Mehrflächen-Plastizitätsmodells, *LACER* No. 8, 2003.
- [10] J. Schmidt, M. Kaliske. Entwicklung von Materialmodellen für Holz, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64, 393–402, 2006.
- [11] J. Nairn. A. Material point method calculations with explicit cracks. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 4, pp. 649-664, 2003.
- [12] F. Wittel. Diskrete Elemente - Modelle zur Bestimmung der Festigkeitsevolution in Verbundwerkstoffen, Dissertation Universität Stuttgart, 2006.
- [13] I. Smith, E. Landis, M. Gong. *Fracture and fatigue in wood*. Wiley & Sons, Chichester, England. 2003.
- [14] P. Lieblang. Beitrag zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens von Holz mit Methoden der Mikromechanik, Dissertation, RWTH Aachen, 2000.
- [15] B. Kasal, R. J. Leichti. State of the art in multi-axial phenomenological failure criteria for wood members. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(1), 3-13, 2005.
- [16] S.W. Tsai, E.M. Wu. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials* 5: 58-80, 1971.

## 8.1 Vollholz

### Vom Baum zum Bau oder die Quadratur des Kreises

**Peer Haller**

#### **1 Technik im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie**

Die Bedeutung des Baustoffes Holz und den Beitrag, den er über das Bauwesen hinaus zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten kann, wird entscheidend davon abhängen, in welchem Umfang unsere Aufgaben damit wirtschaftlich und qualitativ befriedigend gelöst werden können. Es genügt daher nicht, über einen nachwachsenden Rohstoff zu verfügen, er muss auch heutigen und künftigen Anforderungen gewachsen sein.

Materialentscheidungen werden von Ingenieuren nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten getroffen. Sie kommen in ihrer akademischen Ausbildung mit einer reichen Palette an Bau- und Werkstoffen in Berührung, die sich in Zukunft noch weiter zu ihren Gunsten vergrößern wird. Im Gegensatz zum Handwerk ist dieser Beruf nicht auf ein bestimmtes Material festgelegt, jedoch scheidet der Einsatz von Holz in vielen Bereichen der Technik von vornherein aus, so dass seine Verwendung eigentlich nur noch im Bauwesen ernsthaft in Erwägung gezogen wird. Eine Entscheidung für das Holz bedarf trotz ökologischer Vorzüge der Stärkung technischer und wirtschaftlicher Argumente. Naturwissenschaft und Technik sollten daher die Voraussetzungen für eine effiziente Nutzung und stärkere Inanspruchnahme dieser Ressource schaffen.

Der Wald ist weltweit nicht nur einer der größten, sondern auch einer der billigsten Stoffproduzenten. Es ist schwer einzusehen, dass ein Stoff, der auf einem Drittel der Fläche unseres Landes mit Hilfe von Sonnenenergie nachwächst, preislich von Materialien unterboten werden kann, zu deren Herstellung erhebliche Mengen fossiler Energie und Kapital bereitgestellt werden müssen. Ein entscheidender Grund ist darin zu sehen, dass wir den Forst nicht als Stoff- sondern als

Querschnittsproduzenten betrachten. Hiervon wird noch eingehender die Rede sein.

Darüber hinaus wird man sich die Frage stellen müssen, welche weiteren Nachteile der Verwendung von Holz in technischen Anwendungen entgegenstehen und inwieweit sie sich beseitigen lassen. Es sind:

1. das kleine Festigkeitsspektrum im Vergleich zu den Strukturwerkstoffen,
2. die Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften, auch Anisotropie genannt und
3. die geringe Dauerhaftigkeit gegenüber der Witterung.

#### **2 Dicht, dichter, am dichtesten**

Holz hat ein sehr ausgewogenes Eigenschaftsprofil, wird jedoch in nahezu allen Merkmalen von ausgesprochenen Spezialisten übertroffen. Unumschränkt ist seine Umweltfreundlichkeit, sofern diese nicht durch nachträgliche Behandlungen in Frage gestellt wird. Auch der Preis pro Tonne, bei dem selbst eine thermische Verwertung noch in Betracht gezogen werden kann, ist gegenüber vielen heutigen Materialien konkurrenzlos billig.

Die mechanischen Kennwerte spielen bei tragenden Strukturen eine zentrale Rolle und hängen weitgehend von der Dichte und Wachstumsstruktur ab. Die Unterschiede betragen unter den Holzarten etwa eine Größenordnung. Der Vergleich von Bauholz mit faserparallelem Holz ohne Äste und Wuchsunregelmäßigkeiten fördert nochmals beträchtliche Differenzen zutage, so dass das ungenutzte Festigkeitspotenzial sich insgesamt auf reichlich eine Größenordnung beläuft.

Das Verdichten von Holz (Abb. 1), vornehmlich Laubholz, unter Wärme und Druck ist in der Holztechnologie seit langem bekannt und auch heute

werden kunstharzgebundene Furnierholzplatten nach diesem Verfahren zum Beispiel für den elektrischen Anlagenbau hergestellt. Voraussetzung für das Verdichten ist der Zellaufbau des Holzes, der nach Erreichen der Erweichungstemperatur des Lignins unter einer Presse verdichtet werden kann. Durch diese thermomechanische Behandlung lassen sich Festigkeit und Steifigkeit proportional zur Verdichtung steigern. Die weitere Erhitzung über 200 °C bewirkt außerdem eine Zunahme der biologischen Resistenz, so dass mit der Wärme zwei wesentliche Eigenschaften nämlich Festigkeit und Dauerhaftigkeit tangiert werden.



Abb. 1: Fichte-Kantholzquerschnitt vor und nach der Verdichtung

In Abb. 2 sind die Festigkeitsklassen verschiedener Baustoffe und deren Verbünde dargestellt. Holz weist diesbezüglich eine enge Stufung auf, die jedoch durch die Verwendung von faserparallelem Holz und die Verdichtung (Abb. 3) deutlich erweitert werden kann.

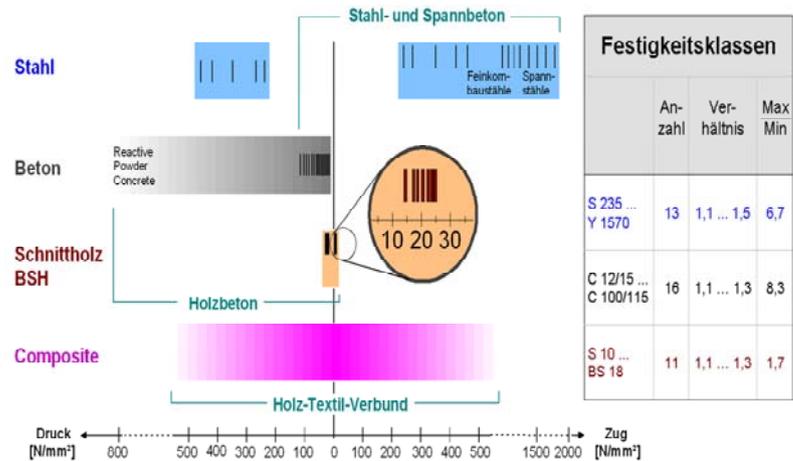


Abb. 2: Festigkeitswerte und Festigkeitsklassen heutiger Baustoffe und Baustoffentwicklungen

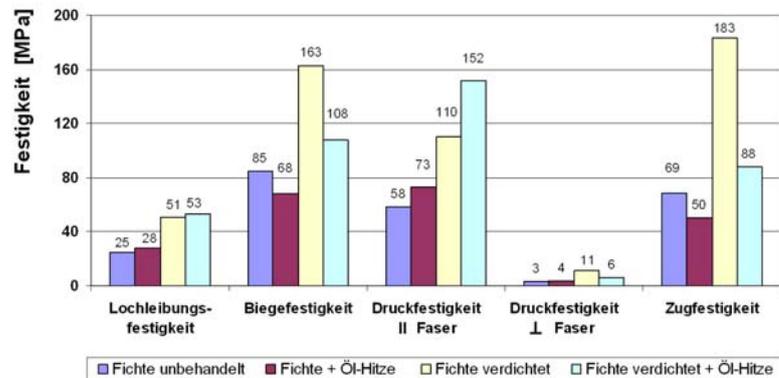


Abb. 3: Festigkeiten von faserparallelem Nadelholz (Fichte), unbehandelt; öl-hitzebehandelt; verdichtet; verdichtet und öl-hitzebehandelt

### 3 Vom Stamm zum Querschnitt

Das Wachstum des Baumes und dessen Auftreten im Sägewerk führen einerseits zu hohen Verlusten, andererseits zu Vollquerschnitten, welche verglichen mit technischen Profilen geringe Flächenmomente erzielen. Während der Stoffproduzent Wald zu den preiswürdigsten Stoffanbietern gehört, geht die Wettbewerbsfähigkeit bei der Transformation des Rohholzes in Querschnitten verloren. Es ist daher unabdingbar, die Möglichkeiten der Materialeinsparung bei der Querschnittsbildung auszuloten.

Die Sägereitechnik ist erster und wichtigster Prozessschritt bei der Bereitstellung von Querschnitten und bestimmt durch Rohholzausbeute und Verschnitt im wesentlichen den Stofffluss und damit die Preisstruktur anderer, zum Teil konkurrierender Holzprodukte. Die Eindimensionalität dieser Technologie favorisiert mit Blick auf die Ausbeute wiederum „eindimensionale“ Baumarten, was im Zuge von Wiederaufforstungen den Nadelhölzern, insbesondere der Fichte, den Vorzug gegenüber standorttypischen Laubholzarten, wie zum Beispiel Eiche oder Buche mit ihren weitverzweigten Kronen, gegeben hat.

Holz gilt als leicht zu bearbeitendes Material, doch das Gegenteil trifft zu! Die Transformation des Rohholzes zum Querschnitt erfolgt ausschließlich durch spanende Verfahren und späteres Fügen mit synthetischen Bindemitteln. Kenntnisse der Mikrostruktur werden nicht benötigt. Hier liegen jedoch große Potenziale für neue Verfahren und Produkte, denen bisher in Wissenschaft und Technik wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde.

Das Sägewerk liefert einen rechteckigen Kant Holzquerschnitt, der im Gegensatz zu technischen

Profilen aus Metall oder Kunststoff eine geringe Materialeffizienz aufweist. Zusammen mit der schlechten Rohholzausbeute beim Sägen fällt sie geradezu dramatisch aus. In Abb. 4 sind ausgehend vom Rundholz die Stoffausbeute sowie das erzielte Flächenmoment in der Wertschöpfungskette verschiedener Querschnittsarten dargestellt.

Intuitiv verbinden wir mit hoher Festigkeit die besondere Eignung für tragende Anwendungen. Dies muss etwas differenzierter betrachtet werden. Was tun Ingenieure bei der Planung von Tragwerken? Sie übertragen Kräfte und Momente mit Hilfe des Produktes aus einer stofflichen Größe – nämlich der Festigkeit – und einer geometrischen Größe, also Querschnittsfläche oder Flächenmoment. Salopp gesagt: ist ein Werkstoff nur halb so fest, verdoppeln sie dessen Querschnittsfläche. Und zwar höchstens verdoppeln, denn bei den Flächenmomenten geht der Abstand des Querschnittes zur neutralen Faser in der Potenz ein. Daher lässt sich die Dimensionierung von Bauteilen auch leichter über die Abmessungen des Querschnittes als durch die Wahl der Festigkeitsklasse vornehmen.

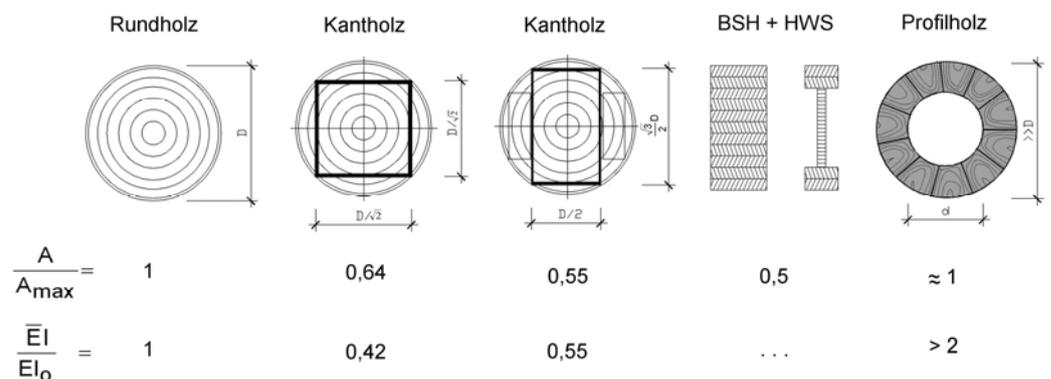


Abb. 4: Holz ausbeute bezogen auf das Rundholz und Biegesteifigkeit EI verschiedener Querschnittstechnologien

Das Selbstverständnis des runden oder rechteckigen Vollquerschnittes im Holzbau verstellt den Blick auf dessen geringe Ressourcenproduktivität. Vergleicht man diesbezüglich Kantholz mit technischen Profilen, ergibt sich ein Verhältnis von etwa 1:15, das sich einerseits aus den Verlusten im Sägewerk und andererseits aus dem geringen Flächenmoment des Vollquerschnittes zusammensetzt (siehe Abb. 5).

Da das Holz nur mittelbar über den Querschnitt wirksam ist, muss es dort nach mechanischen Überlegungen optimal angeordnet werden und dabei drei Voraussetzungen erfüllen:

1. Der Querschnitt darf nicht durch die Abmessungen des Baumes in Quer- oder Längsrichtung begrenzt sein,
2. er muss effizient sein, das heißt, bei gegebenem Flächeninhalt ein großes Flächenmoment aufweisen, und
3. er muss in großen Mengen billig produziert werden können.

Kantholz erfüllt die Punkte 1 und 2 nicht, verleimtes Holz nicht die Punkte 2 und 3. Erst das in den Abbildungen 6 und 7 gezeigte Formholzprofil, dem ein neues Werkstoffverständnis zugrunde liegt, erfüllt potenziell alle drei Forderungen.

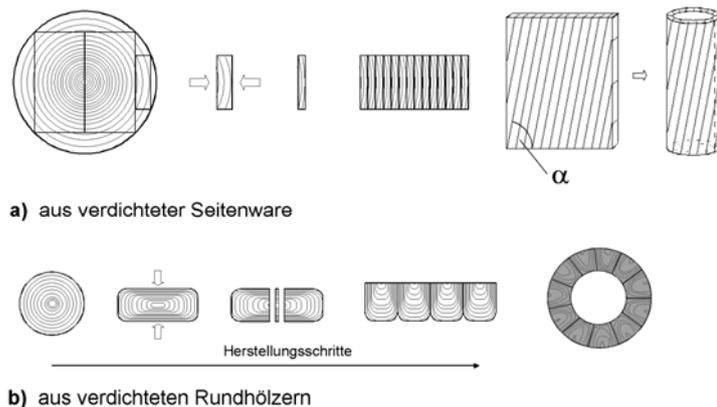


Abb. 6: Prozess zur Herstellung geformter Holzprofile aus Kant- und Rundholz

#### 4 Holz in Hochform

Technologisch gesehen beruht das Bauen mit Holz auf zwei Grundprozessen: dem Trennen – also Sägen, Hobeln, Zerfasern etc. – und dem späteren Fügen durch synthetische und metallische Binde- bzw. Verbindungsmittel. Man vergegenwärtige sich die vielfältigen konstruktiven Möglichkeiten, die mit jedem dieser Grundprozesse und deren Kombination verbunden sind, und welche uns mit einem oder zwei weiteren zuwachsen... .

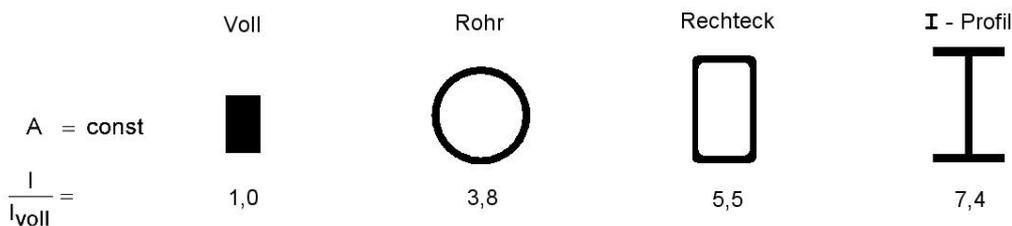


Abb. 5: Vergleich des Flächenmomentes I des rechteckigen Vollquerschnittes mit Profilen gleicher Fläche

Das in der Bundesrepublik vorherrschende Nadelholz weist ein Porenvolumen von ca. 60 % auf. Seine polymere Zusammensetzung gestattet bei einer Temperatur von 140 °C und einem Druck von 5 MPa eine leichte plastische Formgebung quer zur Faser. Die Querschnittsabmessung kann dabei auf etwa die Hälfte reduziert werden (siehe Abb. 1), wobei sich die Mikrostruktur des Holzes zusammenfaltet. Auf diese Möglichkeit wurde zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im vorausgegangen Abschnitt bereits hingewiesen.

Von nicht geringerer Bedeutung ist die Feststellung, dass die Stauchung ohne Schädigungen der Mikrostruktur bei geeignetem Prozessregime wieder nahezu vollständig rückgängig gemacht und fixiert werden kann.

Der große Porenanteil führt somit zu einer völlig neuen Betrachtungsweise des Holzes als schaumstoffartiges, zelluläres Gebilde, das nun tatsächlich zu einem sehr leicht zu verarbeitenden Material wird. Auf diese Weise erhöht sich die Bruchdehnung in Faserquerrichtung von einem auf 100 %, also um zwei Größenordnungen. Nadel- und Laubhölzer sind dafür gleichermaßen geeignet.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurden am Institut für Stahl- und Holzbau Platten aus Pressholz geleimt, deren Verdichtungsrichtung in Plattenebene verläuft. Im nachfolgenden Formprozess wird die Stauchung unter Zufuhr von Wärme und Feuchtigkeit zur Herstellung prismatischer Querschnitte genutzt, wobei die Zellen vollständig wieder auseinander gefaltet werden.

Der Krümmungsradius der Umformung hängt von der vorherigen Verdichtung ab. Die minimale Krümmung entspricht verfahrensbedingt in etwa der zweifachen Plattendicke. Prinzipiell sind auf diese Weise alle offenen und geschlossenen pris-

matischen Querschnitte in beliebiger Länge herstellbar.



Abb.7: Ringförmiger Querschnitt aus verdichteten Halbrundhölzern

Nach diesem mittlerweile patentierten Verfahren wurden bereits mit Erfolg Rohre mit tragwerksnahen Abmessungen gefertigt. Abb. 6 zeigt eine Verfahrensvariante, die von Rundholz ausgeht, welches zunächst verdichtet wird. Das Auftrennen in Richtung der maximalen Dichte und das anschließende Verleimen führen zu einer massiven Platte, die auf thermo-mechanischen Wege in ein Rohr überführt werden kann. Die auf das Rundholz bezogene Materialeinsparung beläuft sich auf etwa 80 %!, wobei 50 % aus der Abfallvermeidung in der Sägerei resultieren und die weitere Einsparung mit der effizienten Anordnung im Profil erzielt wird.

### 5 Faden begegnet Faser

Für die tragende Verwendung von Holz ist neben dem mechanischen und biotischen Verhalten, die Anisotropie von großer Bedeutung. Während sich erstere durch Sortierung sowie thermische bzw. thermo-mechanische Verfahren verbessern lassen, begegnet man der Richtungsabhängigkeit der Festigkeit mit unterschiedlichen konstruktiven Maßnahmen.

Festigkeit und Steifigkeit können im Zuge der Querschnittsdimensionierung in Längsrichtung sehr wirksam kompensiert werden, hingegen stellen die Schub- und Querbeanspruchungen selbst erfahrene Tragwerksplaner immer wieder vor Probleme, die mittlerweile eine Vielzahl verschiedener Lösungsansätze und Nachweise hervorgebracht und zu einem unübersichtlichen Spezialwissen geführt haben. Es ist daher wünschenswert, den in Zusammenhang mit der Anisotropie stehenden Problemen auch mit einer universellen Technologie zu begegnen.

Ein Blick auf die Natur könnte manches lehren, denn in vielen natürlichen Konstruktionen werden mechanische Spannungen von einer optimal ausgerichteten Faser aufgenommen: in der Astverzweigung, im Strohalm oder im Muskel etc. An ihrem Vorbild haben sich in der Technik die faserverstärkten Kunststoffe orientiert. Das Verbinden von Fäden zu einem flächigen oder räumlichen Gebilde ist Gegenstand der Textiltechnik. Ihr Einsatz im Bauwesen wird im Sonderforschungsbereich SFB 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ an der Fakultät Bauingenieurwesen untersucht.

Im Rahmen dieses SFB's werden auch die Grundlagen zur textilen Verstärkung von Holzbauteilen erarbeitet. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit dem Institut für Textil- und Bekleidungstechnik ermöglicht dem Holzbau in Dresden die Verstärkung mit form- und beanspruchungsgerechten textilen Bewehrungen aus Glas-, Kohle-, Aramid- und Naturfasern, die anschließend mit synthetischen Harzen aufgebracht werden.

Mit Hilfe technischer Textilien wird auch eine Brücke vom Holz- zum Leichtbau geschlagen, so dass hier ebenfalls mit einer Akzeptanz zu rechnen ist, die mittelfristig eine völlig neue Qualität im Um-

gang mit dieser nachwachsenden Ressource erwarten lässt.

Neben den mechanischen Eigenschaften erweist sich in der Konstruktion die geringe Dauerhaftigkeit organischer Baustoffe bei der Außenanwendung als entscheidender Nachteil, dem man heute auf stofflicher oder konstruktiver Ebene begegnet. In beiden Fällen fallen jedoch zusätzliche Kosten an.

Die vollflächige Bewehrung ganzer Bauteile in Verbindung mit Oberflächenbehandlungen des Leichtbaus stellt neben der statischen Verstärkung auch einen wirksamen konstruktiven Schutz gegenüber der Witterung dar. Dies ist ein entscheidender Vorteil nicht nur bei Feuchtigkeit sondern auch in Hinblick auf korrosive Umgebungen.



Abb.8: Rohrquerschnitte mit textiler Bewehrung, links Kohlefaser, Mitte unbewehrt, rechts Glasfaser, lackiert

## 6 Fazit

Mit den vorliegenden Entwicklungen werden alle Schwachstellen der gegenwärtigen technischen Verwendung von Holz aufgegriffen, und wie ich meine, sehr grundlegend gelöst. Dies betrifft die Rohholzausbeute, die zu geringeren Materialkosten führt, das Verdichten, welches die Enge der Festigkeitsklassen aufweitet, die textile Verstärkung, die als preiswerte Technologie das Problem

der Anisotropie umfassend löst und darüber hinaus das Holz vor der Witterung schützt, und schließlich das Formen effizienter Querschnitte, als die wohl am weitesten reichende Innovation.

Die Neuerungen betreffen alle Anwendungen, für die ein Querschnitt benötigt wird. Dies können tragende Bauteile des Bauwesens wie Stützen und Träger, sowie des Leicht- und Anlagenbaus sein, aber auch nichttragende Teile des Möbel- und Ausbaus sind auf diese Weise herstellbar. Darüber hinaus sind viele Gegenstände mit geschlossenem und offenem prismatischen Querschnitt mit dieser Technologie ausführbar wie zum Beispiel Kabeltrommeln, Masten, Fässer, Behälter, Rotorblätter, Rumpfe etc.

Um eine größere technische Bedeutung zu erzielen, sollten die Eigenschaften des Holzes, seine Querschnitte und Technologien künftig der Vorstellungswelt der Ingenieure besser entsprechen. Mit alten Konstruktionen wird man auch immer auf alte Vorbehalte treffen. Deshalb ist es leichter, neue Wege zu beschreiten, so erstaunlich dies klingen mag. Holz hält auf stofflicher und technologischer Ebene viele Innovationen bereit. Die nachgesagte Innovationsschwäche ist nicht ihm anzulasten, sondern den Strukturen, die wenig zu seiner Entfaltung beitragen.

#### Quellen

- [1] Haller, P.; Birk, T.; Offermann, P.; Cebulla, H.; Fully fashioned biaxial weft knitted and stitch bonded textile reinforcement for wood connections; Composites: Part B 37 (2006) 278-285
- [2] Haller, P.; Vom Baum zum Bau oder die Quadratur des Kreises; Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden; 53 (2004) Heft 1-2; S. 100-104
- [3] Haller, P.; Formholzprofile und textiltbewehrter Beton – Ein neuer Verbundquerschnitt; Beton- und Stahlbetonbau (Hrsg.: Ernst und Sohn); 99, Heft 6, S. 488-489
- [4] Haller, P.; Concepts for textile reinforcements for timber structures; Materials and Structures, (2007), 40: 107-118
- [5] Haller, P.; Wehsener, J.; Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz; Holz als Roh- und Werkstoff (2004) 62: 452-454
- [6] Welzbacher, C.R.; Wehsener, J.; Rapp, A.O.; Haller, P.; Biologische und mechanische Eigenschaften von verdichteter und thermisch behandelter Fichte (picea abies) ; holztechnologie (Hrsg.: Carl Hanser Verlag); 47 (2006) 2, S. 1-6



## 8.1 Vollholz

### Festigkeitsuntersuchungen an Fichtenpressholz (FPH)

**Peer Haller, Jörg Wehsener**

#### 1 Zusammenfassung

Fichtenkantholz wurde unter geringem Druck bei einer Temperatur von 140°C auf einer Mehretagenpresse senkrecht zur Faser auf 50% des Volumens verdichtet, wobei der Prozess in drei Stufen erfolgte: Erhitzen, Verdichten, Rückkühlen. Die mechanischen Eigenschaften des Pressholzes wurden anschließend an fehlerfreien Kleinproben ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass anatomischer Aufbau, Anisotropie, Rohdichte und Feuchtigkeit das Ergebnis beeinflussen, und dass die Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit sich meist proportional zur Verdichtung einstellte. Schädigungen infolge von Faserabweichungen, Ästen oder anderen Holzfehlern traten nur sehr begrenzt auf. In Abhängigkeit von Zeit und Höhe der Temperatureinwirkung verändern sich die Festigkeit, die Holzfärbung sowie das Quell- und Schwindverhalten.

#### 2 Einleitung

Die Festigkeit und Steifigkeit von Holz korreliert sehr gut mit der Rohdichte und den Strukturmerkmalen wie Faserrichtung, Jahrringbreite und Holzart. Diese Feststellung ist für tragende Anwendungen des Bauwesens, des Leicht- und Maschinenbaus von grundlegender Bedeutung.

Ein besonders wirksames technologisches Mittel zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften stellt die thermo-mechanische Verdichtung dar, die für viele technische Anwendungen an Laubholz vorgenommen wird. In der vorliegenden Studie wird die Eignung dieses Verfahren für die Fichte untersucht, da sie als wichtigste heimische Holzart nur mittlere Festigkeitswerte erzielt.

#### 3 Material und Methoden

Entgegen den Empfehlungen der Literatur (Kollmann 1955; Vorreiter 1949) wurde anstelle von Laubhölzern Fichte (*picea abies*) zur Herstellung

von Pressholz verwendet. Nadelholz ist durch seinen anatomischen Aufbau insbesondere des ausgeprägten Dichteunterschiedes im Jahrringaufbau verglichen mit den ring- und zerstreutporigen Laubholzarten weniger gut zur Verdichtung geeignet. Die grundsätzliche Machbarkeit wurde jedoch bereits von [Norimoto et al (1993), Inoue et al (1994), Schrepfer (1997), Tanahashi (1998), Navi und Giradet (2000)] aufgezeigt und bestätigte sich in der vorliegenden Studie.

Die Herstellung des Pressholzes erfolgte auf einer industriellen Mehretagenpresse mit einer Pressfläche von 2500 x 1200 mm. Dabei wurde sägeraues Kantholz mit Querschnittsabmessungen von 2200 x 200 mm, einer Ausgangsfeuchte von 10 % und einer Rohdichte von 380 bis 530 kg/m<sup>3</sup> verwendet. Eine vorherige Aussortierung von Holzmerkmalen wie Äste, Harzgallen oder Faserabweichungen wurde nicht vorgenommen.

Die Verdichtung erfolgte bei einer Presstemperatur von 140°C und einem Druck von etwa 5 MPa vornehmlich in radialer Richtung. Nach Erreichen der Prozessstemperatur wurde die Presse weggesteuert bis auf 50 % der ursprünglichen Höhe der Bohlen geschlossen, so dass sich nach dem Pressen eine Verdopplung der Ausgangsrohichte einstellte. Die Verdichtungsprozess ohne Rückkühlung betrug nach Haller und Wehsener (2003) 30 min.

Die mechanischen Eigenschaften des Fichtenpressholzes wurde für folgende Beanspruchungen an jeweils 10 verdichteten und unverdichteten Probekörpern bestimmt: Biegung (DIN 52186), Zug in Faserrichtung (DIN 52188), Druck parallel (DIN 52185) und senkrecht zur Faser (DIN 52192), Scherung (DIN 52187), Lochleibung (DIN EN 383).

Die Probekörper wurden fehlerfrei aus dem verdichteten Holz herausgeschnitten, wobei keine der üblichen Bearbeitungsformen wie Sägen, Hobeln und Bohren angesichts der hohen Dichte zu besonderen Schwierigkeiten führte.

#### 4 Ergebnisse

Beobachtungen am Rasterelektronenmikroskop haben gezeigt, dass bei radialer Verdichtung von Nadelholz zuerst die Frühholzzellen auf Grund ihrer geringeren Wandstärke verformt und mit zunehmendem Druck völlig geschlossen werden. Die Jahrringe liegen geschichtet aufeinander. Die Zellwände des Frühholzes sind stark gefaltet, jedoch nicht gebrochen oder durch große Verschiebungen an der Spätholz- / Frühholzgrenze abgerissen. Die dicken Zellwände des Spätholzes sind bei einer Verdichtung auf 50 % des Volumens kaum verformt.

Mit steigender Dichte erhöht sich die Festigkeit und Steifigkeit, jedoch erfolgt durch den bereits ab etwa 100°C beginnenden thermischen Abbau eine leichte Versprödung des Pressholzes, die jedoch weit weniger ausgeprägt ist als bei der Hitzebehandlung, wie sie zur Erhöhung der biologischen Resistenz üblich ist. Das Bruchverhalten des verdichteten Holzes ist spröder und kurzfasriger.

Die Festigkeitssteigerungen können je nach Belastungsart mit einem Faktor von 1,7 bis 4,4 beziffert werden. In besonderem Maße profitiert die Querdruckfestigkeit, die bei vielen tragenden Anwendungen einer besonderen Aufmerksamkeit bedarf (siehe Tab 1, Abbildung 1). Sie wurde an der Quetschgrenze bei definierter Verformung von 5% bestimmt.

Tab. 1: Prüfergebnisse der Festigkeiten

		u [%]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>max</sub> [N]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	s <sub>σ</sub> <sup>(3)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	s <sub>E</sub> <sup>(3)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]
Biegung	Fichte	11,8	390	1490	84	10	12500	1400
	FPH	12,2	870	2970	169	36	20300	4520
	Verhältnis		2,2		2,0		1,6	
Druck	Fichte	11,2	420	21500	54	2	12300	2680
	FPH	11,0	890	42900	108	9	27600	1430
	Verhältnis		2,1		2,0		2,2	
Druck ⊥	Fichte	11,7	420	1000	2,5	0,4	200	15
	FPH	10,6	960	4600	11,1	0,5	750	38
	Verhältnis		2,3		4,4		3,8	
Zug	Fichte	11,9	420	9540	73	15	12200	1580
	FPH	12,0	990	2220	185	19	31000	1520
	Verhältnis		2,3		2,5		2,5	
Lochleibung	Fichte	11,7	420	2270	28	2	40 <sup>(1)</sup>	3,5
	FPH	10,0	850	5780	72	6	93 <sup>(1)</sup>	6,5
	Verhältnis		2,0		2,5		2,3	
Scherfestigkeit	Fichte	10,6	400	18800	9,2	0,8	0,7 <sup>(2)</sup>	0,04
	FPH	9,4	890	31300	15,5	0,7	0,5 <sup>(2)</sup>	0,05
	Verhältnis		2,2		1,7		1,4	

<sup>(1)</sup>Bettungsmodul [N/mm<sup>3</sup>]; <sup>(2)</sup>Verschiebung [mm]; <sup>(3)</sup>Standardabweichung

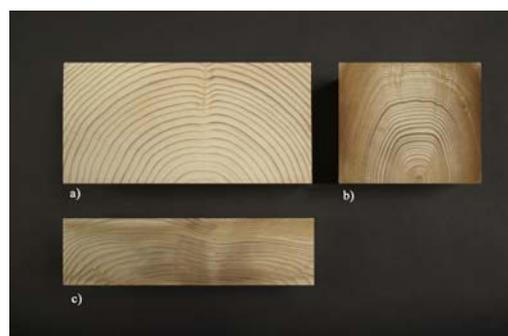


Abb.1: a) Unverdichteter, b) tangential und c) radial verdichteter Nadelholzquerschnitt

### 5 Schlußfolgerung

Die Holzverdichtung von Laubholz ist Stand der Technik. Bei der Verdichtung von Fichte haben sich weder bei der Herstellung noch bei der Bearbeitung oder Verleimung besondere Schwierigkeiten ergeben.

Die mechanischen Untersuchungen an Fichtenpressholz ergaben eine weitgehend proportionale Erhöhung der Steifigkeiten und Festigkeiten mit der Dichte. Die Scher- und Biegefestigkeiten fallen etwas geringer aus; die Druckfestigkeit quer zur Holzfaser erhöhte sich überproportional um den Faktor 4,4. Besonders hervorzuheben ist die Zugfestigkeit, die mit  $185 \text{ N/mm}^2$  nahe an jene Größenordnung des Baustahles heranreicht bei einem Achtel des Gewichtes. Somit ergeben die auf die Dichte bezogenen Festigkeiten keinerlei Hinweise auf Schädigungen des Holzgefüges durch den Prozess. Dieses Ergebnis wird durch mikroskopische Beobachtungen erhärtet.

Die Verdichtung von Nadelholz stellt ein einfaches und preiswertes Verfahren zur Vergütung mechanischer Eigenschaften dar, die besonders in tragenden Anwendungen benötigt werden [Leijten (1998), Haller, Wehsener (2003), Herzog et al. (2003)]. Darüber hinaus ließen sich wüchsige Holzarten geringer Dichte und minderwertige Qualitäten mit diesem Verfahren aufwerten.

**Quellen**

- [1] Haller P, Wehsener J (2003) Entwicklung innovativer Verbindungen aus Pressholz und Glasfaserarmierung für den Ingenieurholzbau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- [2] Herzog T, Naterer J, Schweitzer R, Volz M, Winter W (2003) Holzbauatlas, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München
- [3] Inoue M, Minato K, Norimoto M (1994) Permanent fixation of compressive deformation of wood by crosslinking. *Mokuzai Gakkaishi* 40(9):931-936
- [4] Kollmann F (1955) Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band 2, Springer Verlag, Berlin
- [5] Leijten A (1998) Densified veneer wood reinforced timber joints with expanded tube fasteners. Delft University of Technology; Delft University Press; Netherlands
- [6] Navi P, Tomme F-Ph, Gfeller B, Giradet F (1998) Densified wood: an innovative product with highly enhanced characters. In Tagungsband (Hrsg.) Naterer J, Sandoz J L: 5<sup>th</sup> World Navi P, Giradet F (2000) Effects of Thermo-Hydro-Mechanical Treatment on the Structure and Properties of Wood. Walter de Gruyter Verlag Berlin, *Holzforschung* 54: 287-293
- [7] Norimoto M, Ota Ch, Akitsu H, Yamada T (1993) Permanent fixation of bending deformation in wood by heat treatment, *Wood Research* 79: 23-33
- [8] Schrepfer V (1997) Formvollholz für den Baueinsatz. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Professur für Holztechnologie 97-1: 10
- [9] Conference on Timber Engineering, Montreux, Schweiz, Vol.2, 640-647
- [10] Tanahashi M et al. (1998) Compressive - Molding of Wood by High-Pressure Steam Treatment. Part 1, *Holzforschung* 52: 211–216
- [11] Vorreiter L (1949) Holztechnologisches Handbuch. Band 2, Verlag Georg Fromme & Co., Wien

## 8.1 Vollholz

### Untersuchungen zum thermo- hygromechanischen Verformungsverhalten von Pappelholz aus KUP

**Sonja Ziegler, Peer Haller**

#### 1 Einleitung

Das wachsende Bedürfnis der Welt nach Energie nötigt uns, unseren Umgang mit fossilen und erneuerbaren Rohstoffen zu bedenken und ermutigt uns, deren Verwendung in verschiedensten Anwendungsbereichen zu überdenken, bisherige Produkte zu verbessern und neue Verfahren und Produkte zu entwickeln. Alternative und erneuerbare Energie werden verstärkt eingesetzt und die die Holzindustrie sieht sich einem neuen Mitbewerber um ihren kostbaren Rohstoff konfrontiert. In den vergangenen Jahrzehnten beklagte die Holzwirtschaft ein Überangebot an Holz, das die Preise immer tiefer sinken ließ. Heute ist das Gegenteil der Fall. Die Holzpreise steigen und der erwartete Bedarf wird nicht mehr allein aus dem Wald zu decken sein.

Holz kann durch Druck unter Beachtung bestimmter Randbedingungen verdichtet werden ohne die Zellstruktur zu beschädigen. Dabei faltet sich seine wabenartige Struktur so zusammen, dass diese Verformungsreserven speichert. Dank des sog. Memory Effekt lassen sich die Verformungsreserven zu jedem Zeitpunkt aktivieren, so dass bei einem Verdichtungsgrad von 50% nun zum Querbiegen eine Elastizität von 100% zur Verfügung steht. Dieses Verfahren wurde am Institut für Stahl- und Holzbau der TU Dresden entwickelt und ist patentiert.

Im klassischen Holzbau verwendet man überwiegend Vollquerschnitte, deren Herstellung im Sägewerk mit einem Materialverlust von 50 % verbunden ist. Dieses Material steht dem Tragwerk nicht mehr zur Verfügung. Brettschichtholz vermag zwar große Querschnitte zu erzeugen, ist aber teurer und die Materialausbeute ist ebenso gering wie bei gesägten Querschnitten. Außerdem weisen Vollquerschnitte in den meisten Be-

reichen gegenüber Hohlquerschnitten eine geringe Materialeffizienz auf.

Kurzumtriebsplantagen (KUP) werden hauptsächlich zur Gewinnung von Energieholz angelegt und betrieben. Allerdings lassen sich trotz des gestiegenen Holzpreises oft noch immer nicht zufriedenstellende Preise erzielen. Um höhere Preise erzielen zu können, muss entweder die Nachfrage steigen oder, durch eine Aufwertung des Endprodukts, der Verkaufspreis. Aus diesem Grund wurde untersucht, ob Pappel aus KUP zu Herstellung von Formholz geeignet ist.

#### 2 Vom Baum zum Rohr

Die Idee des oben genannten Verfahrens ist die Umkehr des klassischen Holzbiegeprozesses. Das Holz wird zunächst verdichtet und dann gebogen, wobei man die dem Holz durch das Verdichten zugeführten Verformungsreserven aktiviert (Abb. 1). Der Querschnitt, Balken, Bretter oder wie hier dargestellt, Rundholz, wird zunächst verdichtet. Das verdichtete Holz wird dann zu verdichteten Platten verleimt und anschließend geformt. Dabei lassen sich jegliche offene und geschlossene, prismatische Formen herstellen. Biegt man Holz auf diese Weise, lassen sich Radien biegen, die klein genug sind, um technisch von Bedeutung zu sein.

Die Verdichtung wird bei 140°C durchgeführt und die Verdichtungsgeschwindigkeit ist im Gegensatz zu den industriellen Pressgeschwindigkeiten sehr langsam. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Verdichtung beim Formen auch wieder rückgängig gemacht werden kann. Dies steht im Gegensatz zur herkömmlichen Holzverdichtung, die der Steigerung der Festigkeiten und der Dauerhaftigkeit dient und bei der die Verdichtung permanent im Querschnitt erhalten werden soll.



Abb. 1: Herstellung von Formholzprofilen

### 3 Pappel aus Kurzumtriebsplantagen

Pappel ist bekannt als ein Holz minderer Qualität. Es hat weder die Festigkeit und Dauerhaftigkeit, als Konstruktionsholz eingesetzt zu werden, noch sind seine Farbe und Textur für den Möbel- und Innenausbau interessant. Absatzmarkt sind daher bislang vor allem Span- und Kraftwerke. Das vorliegende Holz stammt von einer, zu Versuchszwecken in Methau, Sachsen, angelegten Plantage. Der Baumabstand war nach einer Durchforstung, drei Jahre nach Anlegen der Plantage relativ groß, so dass die Bäume gerade und gleichmäßig wuchsen und große Zuwachszonen erreicht wurden. Die Jahrringbreite variiert zwischen 5 und 12 mm so dass Stämme mit bis zu 20 cm Durchmesser erzielt werden konnten. Für die Versuche wurden Stämme mit einem Durchmesser von 16 ( $\pm 2$ ) cm gewählt. Bei dem Klon handelte es sich um den in Deutschland zugelassenen MAX I. Mit einer Rohdichte des hier verwendeten Probenmaterials von  $300 \text{ kg/m}^3$  ist diese Pappel mehr als 100 kg leichter als herkömmliche Pappeln.

### 4 Fragestellungen und Probekörper

Ziel ist die Herstellung verdichteten Holzes für das Formen und die Ermittlung eines Materialgesetzes der Verdichtung. Verdichtetes Holz als Grundmaterial für Formholz muss gleichmäßig verdichtete, rückerinnerbar und darf in der Struktur nicht beschädigt sein. Zahlreiche Parameter wie Holzart, Jahrringausrichtung, Temperatur und Feuchte haben einen Einfluss auf die Verdichtung und das Verdichtungsergebnis. Die Probekörper wurden aus Scheiben mit einer Dicke von 20 mm herausgesägt. Sie sind  $40 \times 20 \times 20 \text{ mm}$  groß und wurden dem Querschnitt so entnommen, dass die

Jahrringe entweder radial oder tangential zur Verformungsebene orientiert sind.

Es werden zwei Holzfeuchten betrachtet. Die 7 % feuchten Proben entsprechen dabei gelagerstem, getrocknetem Holz, die 70 % feuchten Proben, grünem Holz. Feuchtigkeit im Holz senkt die Festigkeiten und erweicht die Struktur. Die aufzuwendende Druckkraft wird somit geringer, was sich aus zwei Gründen positiv auf den Verdichtungsprozess auswirkt. Zum einen wird dadurch die benötigte Energie reduziert und zum anderen wird dadurch eine Schädigung der Zellstruktur während des Zellfaltungsprozesses weniger wahrscheinlich. Die Proben werden auf  $120^\circ\text{C}$  vorgeheizt und dann in einer Heißpresse verdichtet. Abhängig von der Holzart wird die Zellstruktur ab einer Temperatur von  $80^\circ\text{C}$  erweicht und dient ebenso wie die Feuchtigkeit als Aktivator einer zerstörungsfreien Verdichtung. Die Proben werden quer zur Wuchsrichtung auf 50% ihrer Höhe verdichtet. Die Verdichtungsgeschwindigkeit beträgt 1 beziehungsweise 4 mm/min.

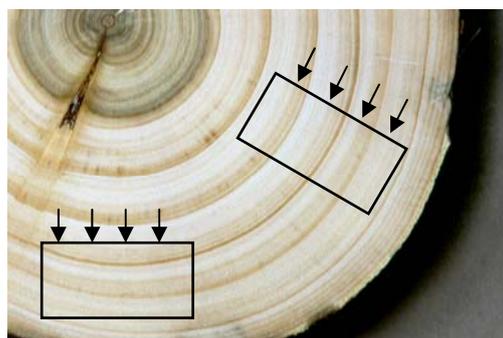


Abb. 2: Proben für Druckversuche

### 5 Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt ein typisches Spannungs- Zeit Diagramm bei einer Verformungsgeschwindigkeit von 4 mm/min. Der Pressvorgang wird gestoppt, wenn der gewünschte Verdichtungsgrad von 50% erreicht wird. Die Proben verbleiben dann

für weitere 10 Minuten in der geschlossenen Presse, um die Relaxation zu studieren. Abgesehen davon, dass die Werte für trockenes Holz drei Mal höher sind als für feuchtes Holz, verlaufen die Kurven sowohl beim Verdichten als auch bei der Relaxation quasi parallel.

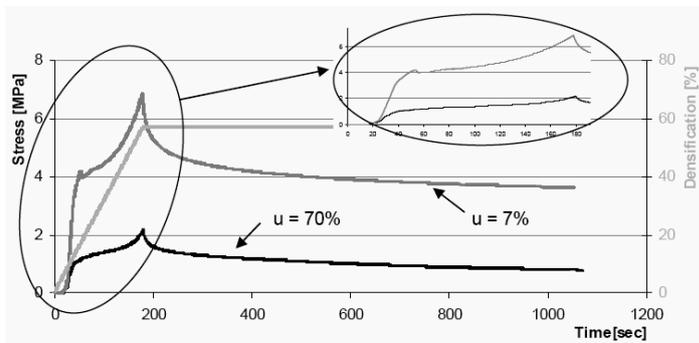


Abb. 3: typischer Spannungs-Zeit Verlauf während der Verdichtung

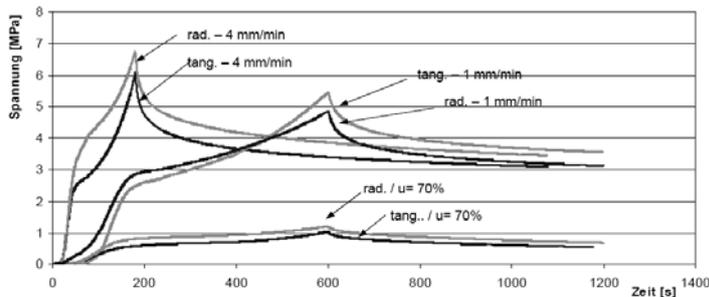


Abb. 4: Verdichtungsdiagramm für verschiedene Verdichtungsparameter (Feuchte, Geschwindigkeit, Jahrringorientierung)

Beim Verdichten werden drei Abschnitte deutlich. Der erste Abschnitt ist linear elastisch und von einer raschen Spannungszunahme und geringen Verformungen gekennzeichnet. Anschließend beginnen die Zellen zu knicken, was zur Folge hat, dass die Kraft nun deutlich weniger ansteigt und die Verformungen sehr groß sind. Dies ist die Phase des Verdichtens. Sind die Lumen gefüllt und kommen die Zellwände aufeinander zu liegen, steigt die Kraft wieder deutlich an. Der Verdichtungsgrad muss nun abhängig von der Holzsorte und der Dichte so gewählt werden, dass die Verformung gleichmäßig über den Querschnitt

verteilt ist und gleichzeitig die Zellwände nicht bei zu hohem Druck untereinander verkleben.

Feuchte senkt die Holzfestigkeit. Um trockenes Holz auf einen Verdichtungsgrad von 50% zu verdichten, muss für trockenes Holz vier Mal so viel Kraft aufgewendet werden, wie für feuchtes Holz (Abb. 4). Eine niedrigere Verdichtungsgeschwindigkeit garantiert einen geringeren Pressdruck und damit auch weniger Schädigungen der Zellstruktur. Gründe für die geringeren Spannungen sind zum einen die bereits während des Verdichtens einsetzende Relaxation die bei geringerer Geschwindigkeit umfangreicher ist und der Wasserdruck bei feuchtem Holz der durch langsameres Verdichten ebenfalls geringer ist. Beide Richtungen, radial und tangential, verhalten sich ähnlich.

Positiver Nebeneffekt des Verdichtens ist die Holz Trocknung durch mechanisches Herauspressen des Wassers. Im grünen Holz wird so und durch die hohe Umgebungstemperatur während des Pressens die Holzfeuchte um 50% reduziert. Die Feuchte des trockenen Holzes sinkt immerhin noch um 30%. Dies ist von ökonomischer Bedeutung, da so die mitunter langen bzw. energieintensiven Trocknungszeiten reduziert werden können.

Obwohl das Verdichten grünen Holzes aus ökonomischen und verdichtungstechnischen Gesichtspunkten hervorragend zu sein scheint, ist dieses Holz letztlich nicht als Formholz einsetzbar. In Abbildung 5 ist die plötzliche Rückerinnerung (spring-back) für verschiedene Vorbehandlungen zusammengestellt. Als plötzliche Rückerinnerung wird hier der prozentuale Betrag der ursprünglich eingebrachten Verdichtung bezeichnet, der aufgrund des Memory-Effektes plötzlich und direkt nach der Entnahme der Probe oder des Balkens aus der Presse, frei wird. Da dieser Betrag dem Formprozess nicht mehr zur Verfügung steht, ist

er zu minimieren. Der Betrag der plötzlichen Rückerinnerung wird maßgeblich von der Holzfeuchte, der Entnahmetemperatur und dem Fortschritt der Relaxation nach der Verdichtung beeinflusst. Holzart und Verdichtungsrichtung haben im Vergleich zu den eben genannten Größen nur einen unwesentlichen Einfluss.

Bei feuchtem Holz beträgt die plötzliche Rückerinnerung durchschnittlich mehr als 70 %. Verformungsreserven sind also quasi kaum mehr vorhanden. Außerdem ist die Rückerinnerung sehr ungleichmäßig. Die Dicke der Proben variiert stark – während die Rückerinnerung an den Rändern noch relativ gering ist, ist sie im Zentrum der Probe besonders stark ausgeprägt. Die plötzliche Rückerinnerung bei trockenem Holz beträgt etwa 20 %; der Querschnitt bleibt eben. Hier sind noch ausreichend Verformungsreserven vorhanden, um zu Formen. Durch längeres Verweilen der Probe in der Presse in Kombination mit Abkühlen der Probe.

Die Betrachtung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung der einzelnen Experimente ermöglicht einen Einblick in die Wirkung der Vorbehandlung. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse für eine Verdichtung in tangentialer Richtung dargestellt. Am leichtesten lässt sich feuchtes Holz verdichten, das auf 120 °C vorgeheizt wurde. Das Falten der Zellen beginnt hier schon bei einer Spannung von 1 MPa, während bei trockenem Holz 2,8 MPa nötig sind. Die Höchstspannung bei einem Verdichtungsgrad von 50 % beträgt 1,8 MPa für das feuchte und 5,1 MPa für das getrocknete Holz.

Ab einer Dehnung von 45% nimmt die Spannung wieder stärker zu, was darauf schließen lässt, dass einzelne Zellwände schon aufeinander liegen, während andere Zellen noch weiter verdichtet werden.

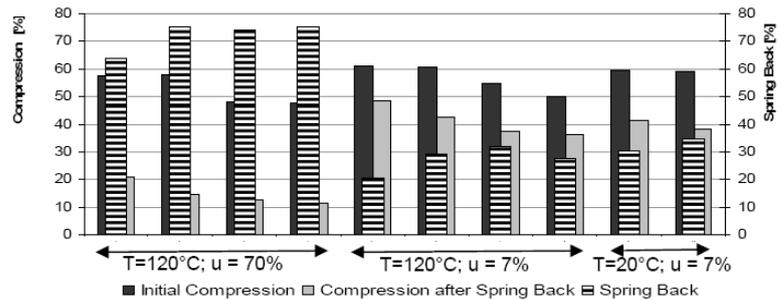


Abb. 5: Rückerrinerung bei Entnahme aus der Presse

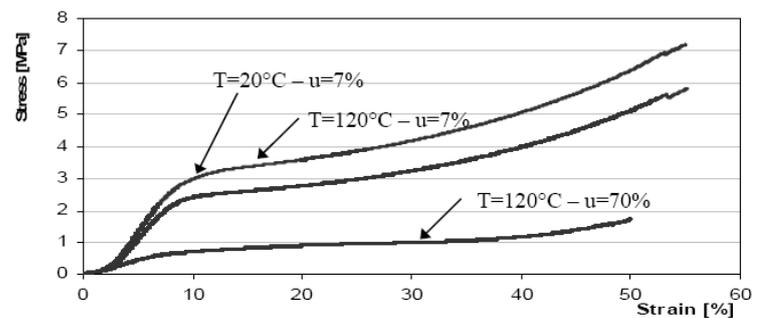


Abb. 6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Verdichtung in tangentialer Richtung

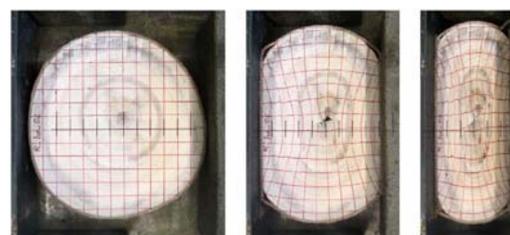


Abb. 7: Verdichten von Rundholz

Versuche an Baumscheiben zeigen, dass sich diese ohne seitliche Begrenzung gut verdichten lassen (Abb. 7). Die Verdichtung selbst ist im Querschnitt unregelmäßig verteilt und zeigt das Spiegelbild des zusammen geschobenen Querschnitts. Die Verdichtung ist in der Mitte in Pressrichtung gleichmäßig und wird bogenförmig zu den Rändern hin geringer. Der äußerste Rand in der Mitte bleibt unverdichtet. Trotz der Unregelmäßigkeit der Verdichtung kann solches Holz bei Beachtung der richtigen Orientierung für das Formen verwendet werden. Problematisch ist der

Riss der sich vom Mark her schon bei geringen Verdichtungen in einem Winkel von etwa 45° zur Pressrichtung ausbildet und beinahe die gesamte Scheibe durchzieht.

### **6 Zusammenfassung**

Schnellwachsende Pappel aus Kurzumtriebsplantagen eignete sich hervorragend zur Herstellung von Formholz. Seine Struktur, seine geringe Dichte und die gleichmäßige Verteilung der Poren sind die idealen Voraussetzungen für einen problemlosen Verdichtungs- und Formprozess. Pflanzte man Pappel zur Herstellung von Formholz, ist darauf zu achten die Pflanzabstände im Gegensatz zu denen der Energieholzgewinnung zu vergrößern.

Alternativ kann die Pflanzung auch nach 3-5 Jahren durchforstet werden. Das Verdichten grünen Holzes ist möglich, aber nicht zu empfehlen. Das Holz sollte vor dem Verdichten gelagert und getrocknet werden. Es bleibt noch zu untersuchen, inwieweit Holz mit einem Feuchtegehalt von 20...35 % zum Verdichten geeignet ist. Die Verdichtungstemperatur sollte zwischen 120 und 160°C liegen. Während des Erhitzens ist darauf zu achten, dass Holz mit niedrigem Feuchtegehalt nicht noch weiter getrocknet wird. Unterschiede bei den Verdichtungsrichtungen sind bei Pappel nicht markant. Die plötzliche Rückerinnerung ist durch geeignete Maßnahmen zu minimieren.



## 8.1 Rohstoff Holz Mondholz

### 1 Einführung

Unter „Mondholz“ bzw. „Mondphasenholz“ versteht man solches Holz, das unter Berücksichtigung des forstwirtschaftlichen Mondkalenders zu einem als „günstig“ angesehenen Zeitpunkt gefällt wurde. Ob dies jedoch bei zunehmendem oder abnehmendem Mond geschehen soll, hängt von dem Kalender ab, den man zu Rate zieht.

Dem Mondholz werden von seinen Befürwortern besondere Qualitäten hinsichtlich Festigkeit, Dauerhaftigkeit, Feuerbeständigkeit und Resistenzen gegenüber Insekten und Pilzen nachgesagt. So wird Mondphasenholz als Bauholz, Brennholz, für Kamine, den Instrumentenbau oder zum Aufbewahren von Lebensmitteln eingesetzt. Dafür muss es verschiedenen Ansprüchen gerecht werden, die nicht immer gleichzeitig erfüllt werden können. Für „Bretter und Bauholz“ sowie für „besonders hartes Holz“ wird ein Holzeinschlag bei zunehmendem Mond empfohlen, hingegen für „Möbel- und Werkzeugholz“, „nichtfaulendes Holz“, „schwundfreies Holz“ sowie „Brücken- und Bootsholz“ ein Einschlag bei abnehmender Mondphase. Welche Eigenschaften bzw. welches Holz für welche Einsatzgebiete idealerweise vorgesehen ist bleibt allerdings meist offen. Werden Brücken nicht aus Brettern und anderem Bauholz hergestellt? Muss Werkzeugholz nicht besonders hart sein? Ist es nicht von Vorteil, wenn Bretter und Bauholz nicht faulen und schwinden?

Der wissenschaftliche Beweis für den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Holzes und dem Zeitpunkt des Fällens konnte bisher, zumindest für das gut untersuchte Fichtenholz und im wesentlichen auch für Eichenholz, nicht erbracht werden.

### 2 Historie

Viele alte Holzbauten beweisen, dass Holz ein dauerhafter Baustoff ist. Beeindruckende Beispiele

hierzu liefern die Stabkirchen in Skandinavien, die rustikalen Holzhäuser in den Alpen oder die kunstvoll verzierten Pagoden und Paläste in Japan und China. Häufig werden diese Beispiele der Holzbaukunst von Verfechtern des Mondholzes mit diesem in Verbindung gebracht. Beweise für die Einhaltung bestimmter Einschlagtermine, Mondphasen o. ä. bei der Holzernte können bei Gebäuden, die mehrere hundert Jahre alt sind, jedoch meist nicht vorgelegt werden. Vielmehr ist die lange Lebensdauer damit zu begründen, dass die damaligen Baumeister die Regeln des konstruktiven (baulichen) Holzschutzes beherrschten und anwendeten.

Da man einst nicht schreiben und lesen konnte, wurden die Arbeitsanweisungen, um sie für die Menschen leichter aufnehmbar zu machen, einfach in Versform oder in einer stark übertriebenen Darstellung aufbereitet. Die alten Bauernregeln werden oftmals als Beweis für das uralte Wissen um die besonderen Eigenschaften des Mondholzes herangezogen. Diese sind nicht prinzipiell falsch, sollten aber im Kontext betrachtet werden. Wahrscheinlich ist, dass diese Empfehlungen oftmals kirchlich oder auch betrieblich motiviert sind. So ist es einfach zu begründen, dass man in bestimmten Monaten nicht das Holz erntete, weil man in diesen Zeiten den Acker bestellen musste. Daraus eine allgemeine Empfehlung abzuleiten, nur im Winter das Holz zu schlagen, ist dadurch kaum zu rechtfertigen.

Aussagen wie „Wer sein Holz um Christmette fällt, dem sein Haus wohl zehnfach hält.“ sagt eigentlich nichts anderes aus, als dass eine Schlägerung in der Frühwinterphase günstig ist. Interpretationen, die suggerieren, dass Holz, das nach dieser Regel geschlagen wurde, eine größere Dauerhaftigkeit besitzt, konnte bisher wissenschaftlich nicht zweifelsfrei belegt werden. Bei den früheren Holzerntemethoden (und teilweise ist es auch heute noch so) kann jedoch das im Frühwinter

geschlagene Holz problemlos über längere Zeit im Wald oder Sägewerk lagern, ohne dass es gleich von Sekundärschäden (Pilze, holzerstörende Insekten) befallen wird. Gleichzeitig ist eine Holzurückung aus dem Wald mit schweren Geräten bei gefrorenem Boden wesentlich schonender.

Dies legt nahe, dass nicht das Holz zum entsprechenden Erntezeitpunkt besser ist, sondern die Rahmenbedingungen. Wenn diese aber durch moderne Transport- und Verarbeitungsmethoden geändert bzw. verbessert sind, verändern sich auch eventuell vorhandene Vor- oder Nachteile für bestimmte Erntezeitpunkte.

Neben dem abnehmenden Mond als „richtigen Zeitpunkt“ für die Holzernte, soll an bestimmten Tagen geerntetes Holz besondere Eigenschaften besitzen. Als besonders häufig genanntes Beispiel hierfür gilt der 1. März. An diesem Tag geschlagenes Holz soll nicht brennen, so jedenfalls wollen es „uralte Quellen“ wissen. Diese nach dem Datum starre und von der Bedeutung für die Holzqualität bedeutungsvolle Regel ist im forstlichen Schrifttum sehr früh dokumentiert – so findet sich diese Regel bereits in einer Veröffentlichung aus dem Jahre 1680. Bei diesen und anderen auf bestimmte Tage und Zeiträume bezogenen Fällterminen bleibt jedoch die Frage, ob die Umstellung vom Julianischen auf den Gregorianischen Kalender (begonnen 1582, endgültig durchgesetzt 1700) berücksichtigt wurde. Insbesondere die Tatsache, dass es 118 Jahre dauerte, bis in ganz Deutschland wieder ein einheitliches Datum eingeführt war (durch die Kalenderreform wurden 10 Tage „übersprungen“), wirft die Frage auf, welche Regeln vor oder nach der gregorianischen Kalenderreform entstanden sind, und welche angepasst oder nicht angepasst wurden.

Kalender, die sich nicht auf feste Termine festlegen, sondern die Fälltermine entsprechend den

Mondphasen und den Tierkreisbildern richten, sind zwar nicht von dieser Kalenderreform betroffen, ein Einfluss auf die Holzqualität ist aber hier ebenso wenig bewiesen wie bei anderen Fällregeln.

### 3 Forschung

Die Skepsis gegenüber wissenschaftlich geführten und wiederholbaren (bzw. wiederholten) Versuchen ist immer noch groß, wohingegen überlieferte, tradierte Informationen ungeprüft angenommen werden. Verschiedene Forschungen (zusammengestellt in [1]) kommen zu dem Schluss, dass „Mondholz“ ebenso gut brennt wie „normales“ Holz, die Resistenz gegen Pilze und Insekten ebenso vergleichbar mit herkömmlich eingeschlagenem Holz ist wie Raumstabilität, Härte (Dichte) und Holzfeuchte, es also zu keiner Verbesserung der Holzeigenschaften kommt.

Demgegenüber stehen Forschungen, die einen Einfluss zu erkennen glauben. Holzwissenschaftler Ernst Zürcher (Hochschule für Architektur, Bau und Holz, Biel) konnte verbesserte Festigkeiten von Mondholz bei 2000 Fichten-Proben feststellen. Außerdem stellte er eine erhöhte Dichte bei Mondholz im Vergleich zu Holz aus normalem Einschlag fest.

Weitere Forschungsergebnisse von Ernst Zürcher z.B. belegen zwar einen Unterschied der Eigenschaften des Mondholzes, allerdings liegen die Unterschiede der verglichenen Mittelwerte der Darrdichten der Proben (insgesamt 30 Stück) von Mondholz und normal geschlagenem Holz bei 10%. Da die natürliche Schwankungsbreite der Eigenschaften von Holz recht groß ist, sollte bei einem positiven Effekt des Einschlagzeitpunktes auf die Eigenschaften des Rohstoffes ein deutlicher Unterschied zu den durchschnittlichen Eigenschaften feststellbar sein – dies entspricht üblicherweise einer Abweichung von deutlich mehr

als 10% der Vergleichsstichprobe von den Mittelwerten der geprüften Eigenschaften.

Von Seiten der Mondholz-Befürworter wird stets propagiert, dass im Winter geschlagenes Mondholz auch deshalb so gut ist, weil sich der Baum zu diesem Zeitpunkt in der Safruhe befindet, die Holzfeuchte somit geringer ist. Forscher der TU Dresden haben in einer Tabelle verschiedene Forschungsergebnisse bezüglich des minimalen und maximalen Wassergehalts in verschiedenen Baumarten zusammengetragen. Die Tabelle zeigt, dass keine allgemeinen Aussagen bezüglich des minimalen und maximalen Wassergehalts gemacht werden können, da dieser von verschiedenen Faktoren abhängig ist (Tab. 1). Grundsätzlich gibt es natürlich eine Veränderung im Holz über den Jahresverlauf durch unterschiedliche physiologische Vorgänge, insbesondere hinsichtlich der

Tab. 1: Jahresgang der Feuchte im Splintholz unterschiedlicher Baumarten. Je nach Untersuchungsmethode, Baumart und Baumalter weisen die Bäume zu fast jeder Jahreszeit einen Höchst- bzw. Niedrigstgehalt an Wasser auf. [1]

Autor	Jahr	Baumart	Baumalter	Methode	Höchster Wassergehalt	Niedrigster Wassergehalt
D. du Monceau	1755	Eiche	-	Stammstücke	Winter	Sommer
Nördlinger	1879	Eiche	-	Stammstücke	Juli	Dezember
Hartig T.	1858/1871	Eiche	16	Bohrkerne	Sommer	Frühling
Büsgen	1911	Buche	-	Bohrkerne	Mai	Spätherbst
Gäumann	1935	Buche	-	Stammscheiben	Sommer	Dez./Jan.
Knuchel	1930	Fichte/ Tanne	-	Balken	keine Änderung	
Langner	1932	Fichte	-	Stammscheiben	Winter	Sommer
Choong	1969	Kiefer	-	-	Winter	Sommer
Gibbs	1958	Laub- bäume	junge Bäume	Zweige, Wipfel	Mai	Marz
Sachsse	1971	Buche	70-100	Stammscheiben	keine Änderung	
Klemm	1963	Pappel	7	Durchstrahlung	Mai	Februar
Burmester	1980	Fichte	75	Bohrkerne	Februar	Juni
Burmester u. Ranke	1981	Eiche	-	-	keine Änderung	
Schulz u. Böhner	1987	Fichte	-	Bohrkerne	keine eindeutigen Ergebnisse	
Glavac et al.	1990	Buche	35/42	Stammscheiben	Herbst	Winter
Schwartz- Spornberger	1990	Fichte	-	Computer- Tomographie	keine eindeutigen Ergebnisse	
		Kiefer	-		September	Juli
		Buche	-		Februar/April	August
Lüttschwager	1990	Kiefer	-	-	Frühsommer	Herbst
Wiebe	1992	Laub- und Nadel- bäume	-	Computer- Tomographie	keine eindeutigen Ergebnisse	
Teischinger und Fellner	2000	Fichte	100	Stammscheiben	Winter	Sommer

Einlagerung von Speicherstoffen. Es ist aber zu beachten, dass sich diese Vorgänge nur im Splintbereich und da nur in den physiologisch aktiven Zellen bzw. Bereichen abspielen, so dass ein Großteil des später als Bauholz eingesetzten Holzes davon gar nicht erfasst ist.

Auch die Freiburger Forstwissenschaftlerin Ute Seeling hat in zwei Studien Mondholz und konventionelles Holz von Eichen und Fichten verglichen. Da ein genauer Einschlagzeitpunkt für Mondholz aufgrund der unterschiedlichen Angaben in den Bauernkalendern nicht festgelegt werden konnte, bezogen die Forscher beide Varianten (abnehmender bzw. zunehmender Mond) in ihre Untersuchung ein und maßen dann, wie stark das Holz nach dem Schlagen sein Volumen verringerte, während es auf natürliche Weise trocknen konnte. Dabei konnte kein Unterschied zwischen dem so genannten Mondholz und dem – gemäß Mondkalender – nicht in der richtigen Mondphase geschlagenen Holz nachgewiesen werden.

Trotzdem hat Mondholz in der Tat sehr oft gute Qualitäten – vermutlich aber aus vielerlei Gründen: Erntezeitpunkt, die Art des Einschnittes, die Lagerung und Trocknung an der Luft. Nicht der Mond macht das Holz zu dem, was es ist, sondern ein Gesamtkonzept von der behutsamen, umweltschonenden Auswahl der Hölzer, bis zur traditionellen und gewissenhaften Verarbeitung – jenseits der Massenproduktion.

#### 4 Vermarktung

Teilweise werden zur Zeit um bis zu 30% höhere Preise für Mondholz verlangt, als für herkömmlich eingeschlagenes Holz. Doch sollte ein Kunde, der im Vergleich zu Holz aus herkömmlichem Einschlag z.B. 20% mehr für Mondholz bezahlt auch ein Anrecht darauf haben, 20% bessere Holzeigenschaften zu bekommen, verglichen mit der besten Holzqualität von Bäumen aus dem preis-

günstigeren Normaleinschlag – dies kann aber, glaubt man den Ergebnissen der verschiedenen Forschungsprojekte, nicht gewährleistet werden. Das Geschäft mit den angeblichen Eigenschaften des „Mondholzes“ birgt die Gefahr, ein falsches Licht auf den Baustoff Holz zu werfen. Werbung, die Versprechungen macht, welche nicht nachweislich gehalten werden können, können dem Holz unter Umständen sogar schaden.

### 5 Fazit

Um endgültig den Einfluss des Mondes auf das Holz zu klären, haben die Forscher der TU Dresden Leitlinien aufgestellt, die den weiteren Umgang mit dem Thema Mondholz betreffen. Nach den Aussagen der Forscher erscheint es notwendig, weitere Forschungen zum Thema durchzuführen, die jedoch nicht von Beginn an als „esoterisch“ abgetan werden sollten. Eine wichtige Voraussetzung ist die Reproduzierbarkeit der Forschungsergebnisse, die zur Zeit für die Forschungsergebnisse, die einen Effekt der Mondphase auf das Holz bestätigen, nicht gegeben ist. Die möglichen Unterschiede der Holzeigenschaften von „Mondholz“ und Holz aus herkömmlichem Einschlag müssen außerhalb der natürlichen Schwankungsbreite liegen, um einen praxisrelevanten und wissenschaftlich anerkannten Charakter zu besitzen. Erst wenn jederzeit reproduzierbare und praxisrelevante Eigenschaftsunterschiede zwischen „Mondholz“ und normalem Holz nachgewiesen wurden, ist es Zeit, die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit bekannt zu geben. Erst wenn die positiven Eigenschaften nachgewiesen und begründbar sind, ist die Werbung mit den speziellen Eigenschaften seriös und eventuell sogar ein höherer Verkaufspreis gerechtfertigt.

### Quellen

- [1] Bues, C.-T.; Triebel, J.: Mythos "Mondholz". Professur für Forstnutzung, TU Dresden.  
[http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_forst\\_geo\\_und\\_hydrowissenschaften/fachrichtung\\_forstwissenschaften/institute/fnft/fn/mondholz/mondholz](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydrowissenschaften/fachrichtung_forstwissenschaften/institute/fnft/fn/mondholz/mondholz)
- [2] Rauch-Schwegler, T.; Rock, S.: Nachhaltig handeln. h.e.p. Verlag, 2005  
<http://www.3sat.de/nano/cstuecke/43070/index.html>
- [3] Schramm, M.: Von Mondholz und Vollmondbeer – Was der Erdtrabant tatsächlich bewirkt. Manuskript, Bayern 2 – radioWissen, Bayerischer Rundfunk  
[www.br-online.de/wissen-bildung/collegeradio/medien/natur-technik/mondholz/manuskript/mondholzn\\_manuskript.pdf](http://www.br-online.de/wissen-bildung/collegeradio/medien/natur-technik/mondholz/manuskript/mondholzn_manuskript.pdf)  
<http://www.br-online.de/wissen-bildung/collegeradio/medien/natur-technik/mondholz/hintergrund/#modul3>
- [4] Zürcher, E.: Holzforschung im Zeichen des Mondes. Lebendige Erde 6/2003

## 8.1 Vollholz

### Holz - die Innere Optimierung der Bäume

**Claus Mattheck**

#### 1 Einleitung

Im Forschungszentrum Karlsruhe wurde die Selbstoptimierung der Baumgestalt untersucht und das Axiom der konstanten Spannung formuliert, an hunderten von Beispielen verifiziert und Verfahren entwickelt, Maschinenbauteile nach diesem Axiom zu designen. Letzteres Verfahren fand bereitwillige Aufnahme seitens der Industrie, und bislang lassen zahlreiche Lizenznehmer bruchgefährdete Bauteile computersimuliert wachsen [1].

Es wurde weiterhin herausgefunden, dass Bäume bei Störung der gleichmäßigen Verteilung der Spannungen auf der Baumoberfläche (Axiom konstanter Spannung) diese durch Reparaturbauten wiederherstellen. So werden innere Faulhöhlen durch äußere Wülste und Risse durch die Ausbildung von Rippen vor der Rissspitze angezeigt.

Lokale Rindenstauchungen in Ziehharmonikaform können lokal hohe Druckspannungen und reißlackartige Rindenablösungen können lokal hohe Zugspannungen bedeuten. Diese Defektsymptome sind Warnsignale in der Körpersprache der Bäume. Sie wurden mit der VTA-Methode (Visual Tree Assessment) dem jeweiligen Defektsymptom zugeordnet. Für die Defektbestätigung wurden Geräte entwickelt und durch umfangreiche Feldstudien Versagenskriterien bereitgestellt [2]. Das kostengünstige Verfahren ist leicht erlernbar und verbreitete sich weltweit schnell. In Deutschland fand es bereits Eingang in die Rechtsprechung auch auf Oberlandesgerichtsebene.

Fast alle diese Untersuchungen bezogen sich auf die äußere Baumgestalt, deren Untersuchung nunmehr als weitgehend abgeschlossen gelten kann.

Die innere Optimierung der Bäume ist biomechanisch relativ wenig erforscht. Die meisten Bücher über Holzanatomie sind eher beschreibender Natur [3-5]. Dies mag wohl auch daran liegen, dass bislang keine Geräte existierten, die es erlaubten, die mechanischen Eigenschaften grüner Hölzer vor Ort, also in der Natur zu bestimmen. Fällt man jedoch einen Baum, zersägt ihn in Holzproben, so ist die Vermeidung von Trocknungsrisen sowie die Zuordnung zum Baum ein Problem. Daher wurden in Zusammenarbeit mit unserem Industriepartner Erich Hunger (Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Wiesloch) mehrere robuste, feldtaugliche Geräte entwickelt, ohne die die nachfolgenden Ergebnisse nicht gefunden worden wären.

Wer nämlich die mechanische Optimierung des Holzes verstehen will, muss erlernen, wie es vom Baum optimal, also lastgerecht eingesetzt wird. Wer nur Bretter untersucht, wird niemals die innere Optimierung der Bäume, also ihre funktionelle Holzanatomie verstehen [6].

#### 2 Messtechnik: Die Fractometerfamilie

Es galt eine Holzprobe zu finden, die mit nur geringer Schädigung des Baumes unter Feldbedingungen leicht zu entnehmen ist, die Fällung des Baumes nicht notwendig macht und dennoch Zugang zu allen versagensrelevanten Festigkeitseigenschaften des Holzes verschafft.

Diese Probe ist der Ø 5 mm Bohrkern, der mit einem sogenannten Zuwachsbohrer, einem hohlen, selbstschneidenden Stahlbohrer entnommen werden kann. Abb. 1 zeigt die Messgrößen, die durch Zerbrechen des Bohrkerns - und nur durch den Bruch einer Probe lassen sich Festigkeiten bestimmen! - sich ergeben.

Um diese Messungen vorzunehmen, wurden sogenannte Fractometer entwickelt. Wegen ihrer relativ niedrigen Kosten verbreiteten sich die Ge-

räte zusammen mit der VTA-Methode weltweit sehr schnell. Studien der Universität Freiburg haben ergeben, dass man allein mit dem Fractometer alle untersuchten Holzzeretzungen durch Fäule problemlos nachweisen kann [7]. Neben der Messtechnik musste auch ein einfaches Holzmodell entworfen werden, das die Mechanik des Holzes in allgemeinverständlicher Weise beschreibt.

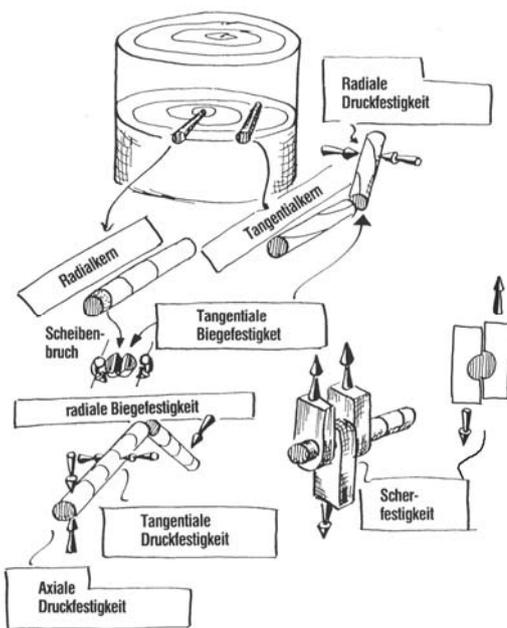


Abb. 1: Festigkeitsgrößen, die sich durch Bruch eines Bohrkernes bestimmen lassen.

### 3 Ein mechanisches Ersatzmodell für Holz

Abbildung 2a zeigt ein Stück eines Jahrringes von ringporigem Holz mit den großen Gefäßen im Frühholz und den eigentlich tragenden Holzzellen in Spätholz. Die Holzzellen bestehen aus einer äußeren Mittellamelle, die die Zellen untereinander verklebt, einer Primärwand, die pro Volumeneinheit viel Lignin enthält und einer inneren Sekundärwand, die pro Volumeneinheit viel Zellulose und weniger Lignin enthält. Die Fasern umsteuern die Holzstrahlen, die die Fasern radial zusammenhalten und wie Fahrradspeichen zur

Baummitte verlaufen. Die Spindelform der Holzstrahlenquerschnitte ermöglicht eine weiche Kraftflussumlenkung, die das Risiko des Faserknickens mindert.

Für die nachfolgenden mechanischen Betrachtungen führen wir ein mechanisches Ersatzmodell ein (Abb. 2b), das zwar nicht in allen Details exakt ist, aber die Vereinfachung ist der Preis für die Anschaulichkeit.

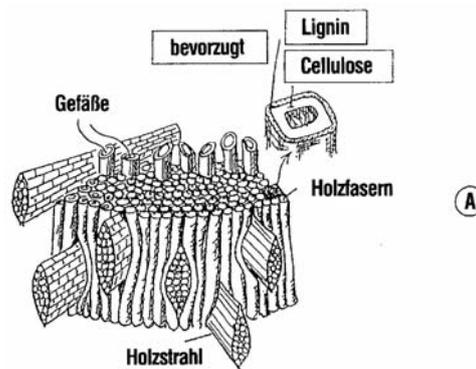


Abb. 2a: Vereinfachte Holzmodelle. Stück eines Jahrringes von ringporigem Holz mit vergrößert gezeichneter Zelle, die aus einer ligninreichen Primärwand und einer zellulosereichen Sekundärwand besteht

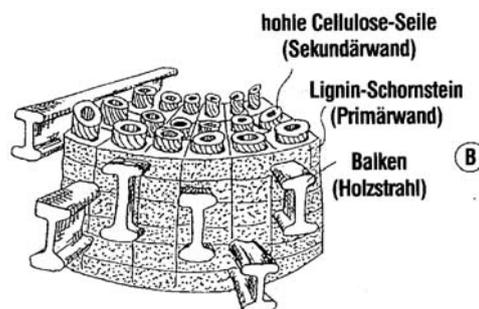


Abb. 2b: Vereinfachte Holzmodelle. Mechanisches Ersatzmodell, bei dem die Primärwände der Holzzellen zu einem System aus Lignin-Schornsteinen miteinander verklebt sind. Die Schornsteine aus sprödem Lignin enthalten je ein biegeweiches, aber zugfestes Zellulose-Hohltau. Die Holzstrahlen stellen eine radiale Armierung dar, die als I-Träger eingezeichnet ist.

Dabei fassen wir die Mittellamelle und Primärwand (und eigentlich auch das in der Sekundärwand enthaltene Lignin) zu einem Ligninschornstein zusammen der mit einem Zellulosehohltau armiert ist. All diese mit Zelluloseseilen gefüllten Schornsteine sind nun miteinander verklebt und werden in radialer Richtung durch die hier als I-Balken eingezeichneten Holzstrahlen armiert. Die Holzstrahlen selbst bestehen ebenfalls aus – nunmehr jedoch radial gerichteten - Ligninschornsteinen mit Zelluloseseilfüllung. Holz ist also ein sprödes Mauerwerk aus Ligninschornsteinen, die axial und radial durch Zelluloseseile zusammengehalten werden. Diese Seile tragen z.B. die Zugspannungen, die auf der Windseite des Baumes auftreten und die Ligninschornsteine die Druckspannungen auf der Leeseite.

Das Holzersatzmodell hat auch den Vorteil, dass man mit ihm die Wirkung holzersetzender Pilze leicht veranschaulichen kann, wie dies in Abbildung 3 für die extremen Holzzersetzungsarten gezeigt ist. Es wurden systematisch die biomechanischen Folgen verschiedener Holzfäulen untersucht und Pilze nach ihrem Gefährlichkeitspotential (Spröd- oder Zähbruch!) klassifiziert [7].



**selektiver Lignin-Abbau**  
Abb. 3a: Sukzessive Weißfäulen bauen zunächst die Lignin-Schornsteine ab. Es verbleibt ein biegeweiches, aber noch recht zugfestes Material aus den Zellulose-Hohltauen verbunden durch Holzstrahlen. Zähbruchrisiko!

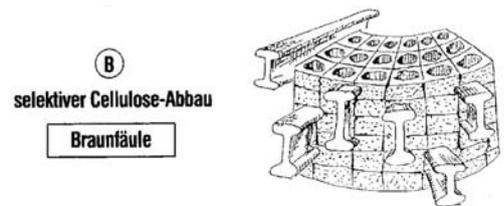


Abb. 3b: Braunfäule zerstört gezielt die Zellulose-Hohltaue und hinterlässt ein steifes, aber sprödes Gerüst aus Lignin-Schornsteinen. So geschädigte Bäume können spröde wie ein Zwieback und ohne Vorwarnung versagen. Baldiges Sprödbuchrisiko!

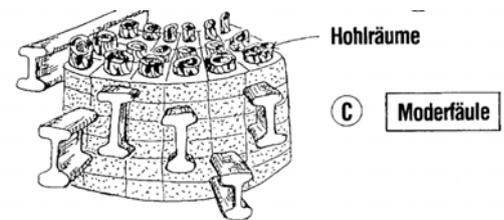


Abb. 3c: Moderfäule bewirkt einen „Lochfraß“ in den Zellulose-Hohltauen, der aber viel träger als bei Braunfäule zur Holzversprödung führt. Spätes Sprödbuchrisiko.

#### 4 Biomechanische Bedeutung der Holzstrahlen

Wenn ein Baumstamm gebogen wird, gibt es ein Bestreben der Jahrringe, aufeinander abzugleiten, so wie dies auch die Seiten eines Buches tun, das man biegt.

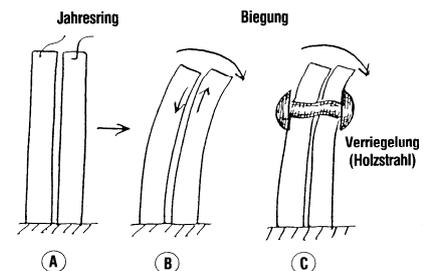


Abb. 4a: Die Holzstrahlen haben auch die Funktion, Gleitbewegungen der Jahrringe gegeneinander durch Verriegelung zu unterdrücken.

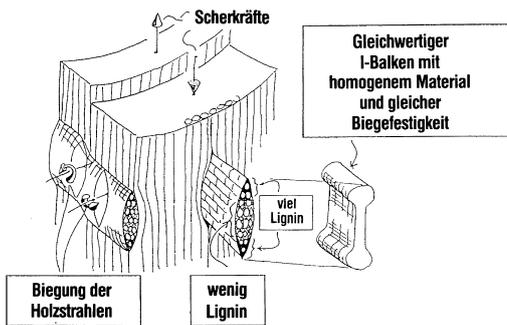


Abb. 4b: Werden die Holzstrahlen auf Biegung belastet, haben sie, wie von Francis Schwarze, Freiburg für Esche nachgewiesen wurde, am oberen und unteren Ende der Spindel mehr Lignin. Sie entsprechen damit trotz ihrer Spindelform einem I-Balken.

Die Holzstrahlen verriegeln benachbarte Jahrringe gegen diese Schubbelastung wie ein Querbolzen (Abb. 4). Die Querbolzen, also die Holzstrahlen, werden dabei auf Biegung belastet. Ihre spindelartige Querschnittsform, die so vorteilhaft eine weiche Umlenkung der Holzfasern wie um einen Schiffsbug erlaubt, ist hier eher nachteilig. Es zeichnet sich ab, als würden die Bäume mit nicht zu hohen Holzstrahlen dies durch eine stärkere Lignifizierung also Aussteifung der Holzstrahlspindelenden ausgleichen. Die Holzstrahlen zumindest einiger Baumarten sind somit getarnte I-Balken [8]. Bei sehr hohen Holzstrahlen wie bei Eiche und Buche ist dies nicht zu erwarten, da diese eher auf Schub als auf Biegung belastet werden.

Eine weitere mechanische Funktion der Holzstrahlen ist der radiale Zusammenhalt der Holzfasern. Dadurch wird der Widerstand des Holzes gegen Längsspaltung enorm erhöht. Die flachwurzelnende Fichte versagt nicht selten durch eine Längsspaltung im Bereich des Wurzelanlaufes, die durch radial nach außen gerichtete Zugspannungen bewirkt wird. Obwohl dieses Maximum sich nun fern des Kambiums, im Bauminneren befindet, scheinen die Bäume dieses Risiko zu erken-

nen. Albrecht wies nämlich genau an den Stellen höchster radialer Zugspannungen auch höchste radiale Fractometerwerte nach, also höchste radiale Festigkeiten [9]. Dies ist in Abbildung 5 qualitativ dargestellt, wobei die Holzstrahlen durch Seile vereinfacht dargestellt sind.

Das Besondere an dieser Erkenntnis ist, dass es offenbar einen Mechanismus gibt, der im „toten“ Holz dieses Maximum mit zunehmendem Dickenwachstum des Baumes nach außen wandern lässt. Der holzanatomische Mikromechanismus ist noch nicht geklärt.

Übrigens wurde von Mattheck und Zipse an schottischen Rotbuchen, die ganzjährig windexponiert waren, auch eine wesentlich höhere axiale Druckfestigkeit auf der druckbelasteten Leeseite als auf der zugbelasteten Luvseite gemessen. Auch die radialen Festigkeiten waren leeseitig höher, wohl um ein Ausknicken der Fasern nach erfolgter Separation voneinander zu vermeiden. Kurz, die Bäume sind radial und in Faserrichtung da am festesten, wo die Belastung des Holzes am größten ist.

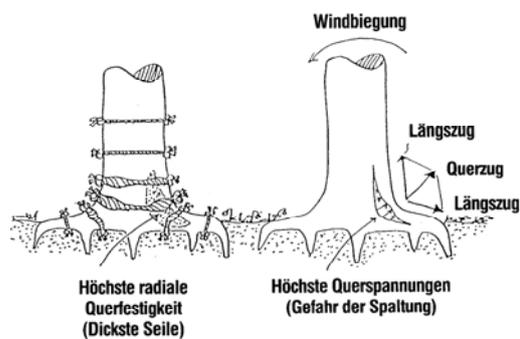


Abb. 5: Neben der Querverriegelung sind die Holzstrahlen auch wesentlich verantwortlich für die Regulierung der radialen Festigkeit. Messungen im Wurzelanlauf von Bäumen zeigten höchste Querfestigkeit da, wo auch die höchsten Radialspannungen wirken.

Wie sieht es aber nun bei Belastung in tangentialer Richtung aus, wo es keine Fasern und keine Holzstrahlen gibt, deren Zelluloseseile den Zug aufnehmen können, wo also Holz allein auf den Kleber zwischen den Ligninschornsteinen angewiesen ist?

**5 Tangentiale Festigkeit - die Achillesferse?**

Wer eine frische Banane geradebiegt, bewirkt eine axiale Spaltung auf deren konvexer Seite (Abb. 6). Ähnliche Risse entstehen, wenn schiefe, aber gekrümmte Bäume oder Äste durch Absinken geradegebogen werden.

Obwohl die Bäume nun keinerlei Kraftträger wie Fasern oder Holzstrahlen in Richtung der Jahrringe, also tangential angeordnet haben, sind sie in der Lage, ihre tangentialen Festigkeiten zu verbessern (Abb. 7).

An jenen gefährlichen konvexen Bereichen der Stammunterseite finden sich nämlich tatsächlich höhere tangentiale Festigkeiten. Auch hier steuert der Baum seinem Versagen entgegen. Da dies allein durch eine Verbesserung des „Klebstoffes“ zwischen den Holzfasern geschieht, ist der Festigkeitszuwachs begrenzt. Die Bäume haben daher noch weitere Mechanismen entwickelt, um die Ausbildung von „Bananenrissen“ zu verhindern.

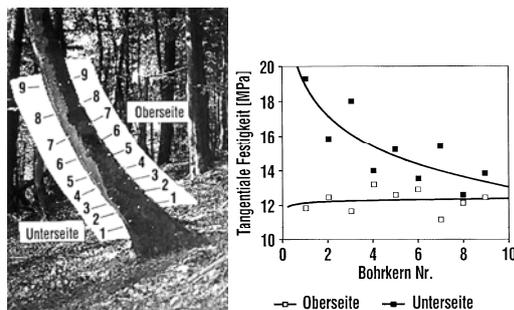


Abb. 7: Schiefe Bäume begegnen dem Risiko der Bananenrisse, indem sie im Bereich der größten Krümmung auf der gefährdeten Baumunterseite höchste tangentiale Festigkeiten erzeugen.

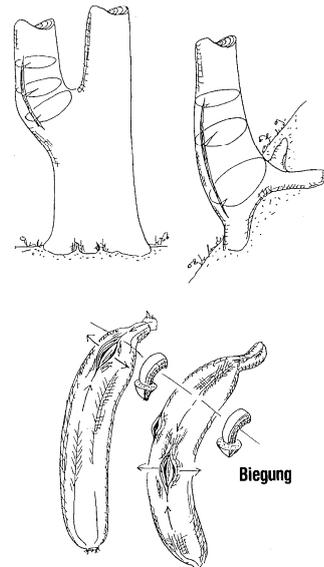


Abb. 6: Der Absenkungsrisse („Bananenriss“) entsteht, wenn krumme Baumteile geradegebogen werden. Er erinnert an das Aufplatzen einer frischen Banane, die man geradebiegt.

**6 Wachstumsspannungen bekämpfen äußere Belastungen**

Zunächst einmal versuchen schiefe Bäume, durch Anlagerung von Reaktionsholz weiteres Absinken zu verhindern. Dies geschieht bei Laubbäumen durch Zugholz auf der Stammoberseite. Das Zugholz schrumpft und zieht dabei den Stamm nach oben wie eine Seilwinde, die beim vitalen Baum über Jahrzehnte erfolgreich sein kann. Bei nachlassender Vitalität oder großer Trockenheit erschlafft die Seilwinde und der Baum senkt sich durch Kriechvorgänge ab. „Bananenrisse“ können sich bilden.

Außer diesen axialen Zugeigenspannungen auf der Baumoberseite hat jeder lebende Baum - auch der gerade Baum - tangentiale Druckspannungen auf der Oberfläche (Abb. 8).

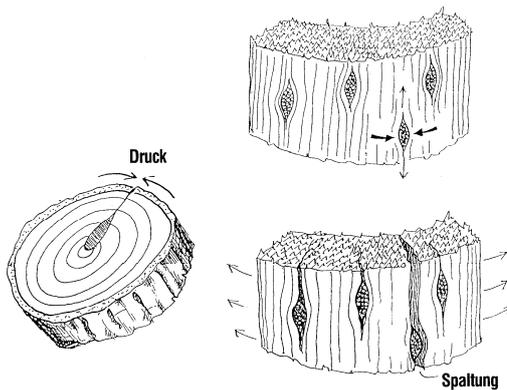


Abb. 8: Bäume haben Wachstumsspannungen, die in Längsrichtung auf der Stammoberfläche Zugspannungen und in Umfangsrichtung Druckspannungen sind. Dieser tangentielle Druck belastet auch die Spindelform der Holzstrahlen in höchst vorteilhafter Weise. Die Holzstrahlen werden zu Rissen, wenn sie quer zur Spindelrichtung gezogen werden. Die Bäume wehren sich gezielt gegen diese Versagen.

Tangentiale Druckspannungen auf der Oberfläche kann man leicht durch einen radialen Sägechnitt nachweisen: Der Sägechnitt verengt sich nahe der Rinde sofort nach dem Herausziehen der Säge. Diese Druckeigenschaften haben nun die vorteilhafte Eigenschaft, die spindelförmigen Querschnitte der Holzstrahlen seitlich zusammenzudrücken und damit die in eben dieser Spindelform begründete Rissgefahr zu vermeiden. Zieht man nämlich eine solche Holzstrahlspindel in tangentialer Richtung, so wirken das obere und untere Ende der Spindel wie eine Risspitze. Die Holzstrahlen müssen zwar der weichen Umlenkung des Faserverlaufes wegen eben diesen spindelförmigen Querschnitt haben, sind aber durch eben diese Form gleichsam schlafende Risse. Sie werden alleine durch die tangentialen Druckeigenschaften unter Kontrolle gehalten (Abb. 8 oben).

Frank Dietrich konnte nun zeigen, dass diese tangentialen Druckspannungen, die allein vom grü-

nen Baum aktiv erzeugt werden müssen, da am größten sind, wo das Risiko der „Bananenrisbildung“ am größten ist. Dazu sägte er Säbelbäume in Scheiben und schlug je ein Paar Nägel nahe der Rinde unter- und oberseitig des schiefen Baumes in die Sägechnittfläche. Sodann wurde je ein weiterer radialer Sägechnitt zwischen die eingeschlagenen Nägel geführt und die Veränderung der Nagelabstände vor und nach dem radialen Sägechnitt gemessen (Abb. 9).

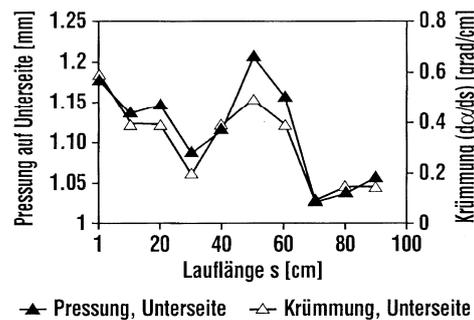
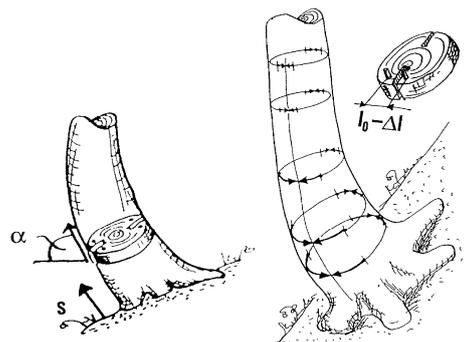


Abb. 9: Die tangentialen Wachstumsspannungen, erkennbar an der Pressung der radialen Sägechnitte, sind am größten, wo die Gefahr der Absenkungsrisse besonders hoch ist, also an Orten größter Stammkrümmung.

Die Verengung des Radialschnittes ist ein Maß für die tangentialen Wachstumsspannungen. Das Risiko der „Bananenrisbildung“ ist da am größten, wo die Krümmung des Stammes am größten ist. Die Schließung des Sägechnittes verläuft weitgehend parallel zum Verlauf der Krümmung des Stammes.

Damit ist bewiesen, dass der Baum seine tangentialen Wachstumsspannungen optimal verteilt [10]. Die Holzstrahlen werden da am meisten seitlich durch tangentiale Wachstumsspannungen gequetscht, wo die Gefahr am größten ist, dass sie durch Querzug zu Rissen werden.

**7 Die Grenzen der Selbstoptimierung**

Immer wieder findet man Bäume mit Schubrisen im unteren Stammbereich, also scheinbar an der falschen Stelle! Weiter oben ist der Stamm dünner, die Scherfläche (Stammquerschnitt) kleiner und damit die querkraftbedingte Schubspannung größer. Die Schubrisse entstehen in der Regel aber am Stammfuß, also unten.

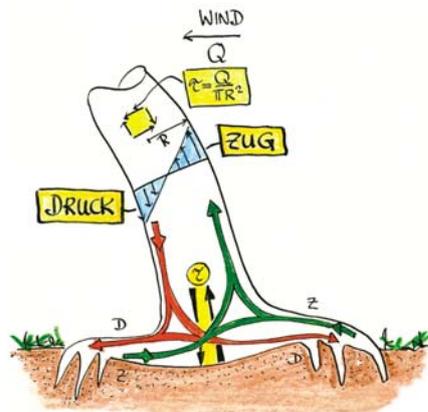


Abb. 10: Windinduzierte Biegebelastung führt zu sich kreuzendem Verlauf der Zug- und Druckkraftflüsse im Stammfuß und entsprechend hohen Schubspannungen zwischen den Holzfasern.

Betrachtet man die Kraftflussverläufe im Stammfuß bei Windbelastung, findet man in der Horizontalwurzel eine s-förmige Biegelinie mit sich kreuzenden Zug- und Druckkraftflüssen. Und auch aus dem Stamm laufen Zug- und Druckkräfte sich kreuzend in die Wurzel ein. Diese Mehrfachkreuzung von Zug und Druck ist praktisch eine Scherbombe! Die Schubspannungen im Stammfuß können fast 50-fach höher sein als oben [11].

Der Pferdefuß an diesem Schubmaximum im Stammfuß ist, dass die Bäume einmal in der jugendlichen Pfahlwurzel angelegte Holzfasern nicht umbilden können. Was in der Jugend für Biegebelastung optimal war, wird im Alter zur Sabotage! Im Alter, wo lange Horizontalwurzeln eine S-Biegelinie bilden, müsste der Baum im inneren gekreuzte Faserverläufe haben. Der alte Baum, insbesondere der Flachwurzler, hat also nicht nur lokal hohe Schubspannungen am Stammfuß, sondern auch geringe Scherfestigkeiten, bedingt durch den lokal nun ungünstigen Faserverläufe - eine Falle der Evolution!

Besonders versagensgefährdet sind auch freigestellte, zuvor phototrop formgestörte Bäume. Diese sind unter gewaltigem Konkurrenzdruck in die Höhe gewachsen, ohne in der Dicke ausreichend zuzulegen. Feldstudien an Laub- und Nadelbäumen haben ein Versagenskriterium, also einen kritischen Schlankheitsgrad, ein kritisches Höhe / Durchmesser Verhältnis von H/D=50 für Bäume ergeben [12]. Von diesem Wert an nimmt die Versagensrate der Bäume schnell zu (Abb.11).

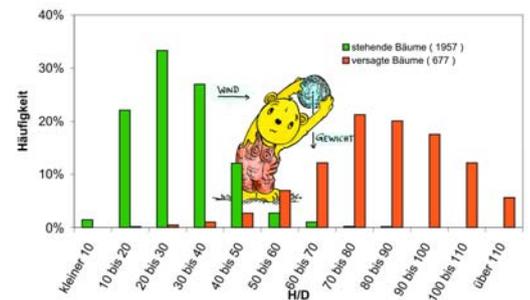


Abb.11: Häufigkeit stehender bzw. versagter Bäume über ihrem Höhe / Durchmesser Verhältnis.

Unterhalb von H/D=50 versagen in der Regel nur Problembäume, z.B. in Staunässe, in dünner Bodendeckung auf Fels oder gesunde Bäume bei Orkan. Der zu schlanke Baum versagt, indem er zuerst vom Wind seitlich verbogen und dann vom Gewicht vollends heruntergezogen wird.

Auch wenn Bäume durch Fäule zunehmend ausgehöhlt werden, steigt das Versagensrisiko. In diesem Fall wird das Versagen durch einen Schubriss eingeleitet, gefolgt von einer Querschnittsverflachung wie beim Schlauchknicken. Da voll bekronte, hohle Bäume bereits um 70% Höhlung versagen können, ist der Schub Sicherheitsfaktor, den der Schubspannungsanstieg überwinden muss, dort  $S = R/t = 1/0,3 = 3,33$  (Abb.12 und 13).

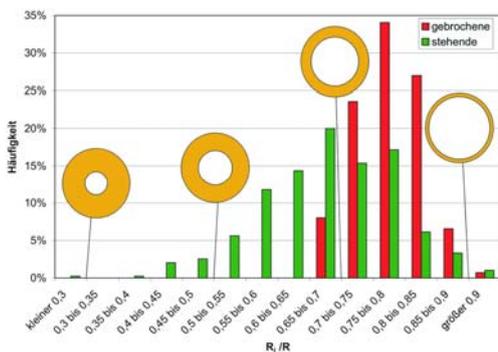


Abb.12: Häufigkeit stehender bzw. gebrochener Bäume über ihrem Höhlungsgrad.

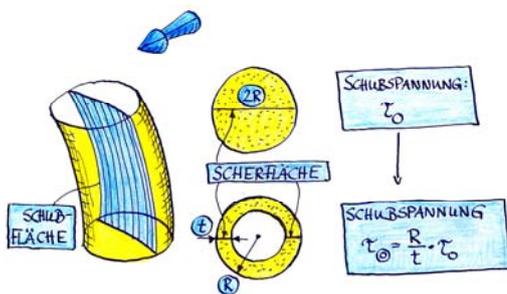


Abb. 13: Die Längsscherfläche im intakten Baum, verläuft entlang des Durchmessers quer zur Last einleitung. Verringert sich die Scherfläche durch Höhlung auf den Bruchteil  $t/R$ , so ist der Schubspannungsüberhöhungsfaktor  $S = R/t$ . Überkritisch hohle Bäume können in der Regel durch Einkürzen wieder sicher gemacht werden.

### 8 Zusammenfassung

Die äußere Gestalt und die Innenarchitektur der Bäume sind in vielen Bereichen optimal an die Belastung angepasst. Die Holzqualität ist da am besten, wo dem Baum die meiste Gefahr droht, wo also in seinem Inneren die höchsten Spannungen wirken. Die Holzstrahlen und Fasern werden durch Wachstumsspannungen entlastet, wo das Versagensrisiko am höchsten ist. Die Wachstumsspannungen wirken also den äußeren Belastungen genau da entgegen, wo diese am gefährlichsten sind.

1. Mechanische Spannungen werden durch lastadaptives Wachstum gleichmäßig auf der Baumoberfläche verteilt.
2. Die Holzfasern verlaufen innerhalb eines Jahres so wie der Kraftfluss, wodurch der Schub zwischen den Holzfasern minimiert wird.
3. Die Holzstrahlen sorgen da für höchste radiale Querfestigkeit, wo das Risiko der tangentialen Spaltung am größten ist.
4. Die Holzfasern sind über ihre „Lignin-Schornsteine“ da am besten verklebt, wo die Gefahr der radialen Längsspaltung („Bananenriss“) am größten ist.
5. Die Holzstrahlen werden durch tangential Wachstumsspannungen dort seitlich am meisten zusammengedrückt, wo das Risiko von „Bananenrissen“ am höchsten ausgeprägt ist, wo also die spindelförmigen Holzstrahlquerschnitte am ehesten auf Querszug belastet werden.

Aber auch die Optimierung der Bäume hat Grenzen, so z.B. bei Schubspannungsrissen in hohlen Bäumen und im Stammfuß, oder die Versagensgefahr durch zu große Schlankheit bei unter gewaltigem Konkurrenzdruck gewachsenen phototrop formgestörten Bäumen die freigestellt werden.

Doch trotz dieser Einschränkungen sind Bäume für die Technik geniale Lehrmeister, deren Selbstoptimierungsmechanismen zur Steigerung der Lebensdauer technischer Bauteile mit großem Erfolg genutzt [12] und heute als Universalform der Natur [13] eingesetzt werden.

#### Quellen

- [1] C. Mattheck: Design in der Natur - Der Baum als Lehrmeister (4. Auflage) Rombach Verlag, Freiburg, 2006
- [2] C. Mattheck: Aktualisierte Feldanleitung für Baumkontrollen mit Visual Tree Assessment, Forschungszentrum Karlsruhe, 2007
- [3] F. H. Schweingruber, Anatomie europäischer Hölzer, Paul Haupt Verlag Bern, 1990
- [4] R. Wagenführ: Anatomie des Holzes, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1980
- [5] D. Grosser: Die Hölzer Mitteleuropas, Springer Verlag. Berlin, 1977
- [6] C. Mattheck, H. Kubler: Wood - The internal Optimization of Trees, Springer Verlag Heidelberg, 2. Auflage 1996
- [7] K. Weber, C. Mattheck: Taschenbuch der Holzfäulen im Baum, Forschungszentrum Karlsruhe, 2001
- [8] C. Mattheck, F.W.M.R. Schwarze: Die Holzstrahlen als getarnte I-Balken in einem mechanischen Ersatzmodell für Holz, Allgemeine Forst und Jagdzeitung 165, 10, 1994, 197-201
- [9] W. Albrecht, K. Bethge, C. Mattheck: Is lateral strength in trees controlled by lateral stress?, Journal of Arboriculture 21 (2), 1995, 83- 87
- [10] F. Dietrich, C. Mattheck: Cracks in sabre-shaped trees and branches, Journal of Theoretical Biology, 173 (1995) 321-327
- [11] C. Mattheck: Warum alles kaputt geht – Form und Versagen in Natur und Technik, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003, ([www.mattheck.de](http://www.mattheck.de))
- [12] C. Mattheck: Verborgene Gestaltgesetze der Natur – Optimalformen ohne Computer, Forschungszentrum Karlsruhe, 2006, ([www.mattheck.de](http://www.mattheck.de))
- [13] C. Mattheck: Einheit in der Vielfalt - Universalformen der Natur, Labor&more, 1/2009, 18-20



## 8.2 Modifizierung von Holz

### 1 Allgemeines

Holz ist ein anisotroper Werkstoff und seine technologischen Eigenschaften unterliegen dem Einfluss des Umgebungsklimas. Dies gilt jedoch für die verschiedenen Holzarten in sehr unterschiedlichem Maße. Holz unterliegt ferner biologischen Abbauprozessen, was im Sinn der biologischen Rückführung in die natürlichen Kreisläufe positiv zu werten ist, aber die natürliche Dauerhaftigkeit von Holz im Außenbereich einschränkt. Auch hier bestehen zwischen den unterschiedlichen Holzarten große Unterschiede. Der Einsatz von relativ dimensionsstabilen und dauerhaften Importholzarten aus den Tropen und Subtropen sowie die Behandlung wenig dauerhafter Hölzer mit Bioziden waren in der Vergangenheit die Lösungsansätze der Holzwirtschaft, um diesen natürlichen Nachteilen von Holz entgegenzuwirken. Allerdings sind in den letzten 20 Jahren sowohl die chemischen Holzschutzmittel mit ihren Wirkstoffen und deren Umweltwirkungen als auch die Bewirtschaftung und der Raubbau der tropischen und subtropischen Wälder in die Diskussion geraten. Als Folge setzte in manchen Bereichen, wie beispielsweise auf dem Fenstermarkt, eine massive Verdrängung und Substitution des Werkstoffes Holz durch andere Werkstoffe ein.

Um Holz wieder konkurrenzfähiger zu machen und die Marktposition der von kleinen und mittelständischen Unternehmen dominierten Holzindustrie zu stärken, bedarf es innovativer Technologien, welche gerade die Eigenschaften von einheimischen Holzarten in kritischen Einsatzbereichen verbessern und ihren Einsatz attraktiver machen. Aus diesen Entwicklungen folgte die Suche nach Alternativen für die Behandlung mit Holzschutzmitteln. In den letzten zehn bis fünfzehn Jahren wurden verstärkt Versuche unternommen, um Holz in seiner chemischen Struktur so zu modifizieren, dass die physikalischen und biologischen Eigenschaften wesentlich verbessert werden. Dies betrifft vor allem die Verminderung der

Hygroskopizität des Holzes und die Verbesserung seiner Dauerhaftigkeit.

### 2 Definition

Allgemein wird unter einer Modifikation ein Vorgang verstanden, um etwas im Hinblick auf bestimmte Erfordernisse oder Gegebenheiten abzuwandeln. Bei der Holzmodifizierung wird der chemische Aufbau der Holzzellen ohne Einsatz von Giften grundsätzlich verändert. Die Veränderung der chemischen Konstitution des Holzes hat die Absicht, verfahrenstechnische Vorteile oder neue Produkte zu gewinnen. Die Modifizierung von Holz lässt sich in Hauptgruppen unterteilen. Am Bedeutendsten, da bereits teilweise auf dem Markt verfügbar, sind sicherlich die thermische und die chemische Modifikation von Holz. Noch erforscht wird die biologische Modifikation. Des Weiteren bilden die mechanische Modifikation, in Form von Pressholz und in Zukunft vielleicht auch die genetische Modifikation weitere Hauptgruppen. Innerhalb der Modifizierungsgruppen kommt es zu einer weiteren Unterteilung in Modifizierungsverfahren. Die verschiedenen Holzmodifizierungsverfahren basieren auf unterschiedlichen Wirkprinzipien. Unter Modifizierung versteht man die Behandlung von Holz über den gesamten Querschnitt. Bei herkömmlichen Hydrophobierungen mit Wachsen, Ölen oder Paraffin handelt es sich um eine Oberflächenbehandlung und nicht um eine Modifizierung.

### 3 Grund für Holzmodifikation

Das Holz wird durch gezielte Eingriffe sehr viel widerstandsfähiger gegen Feuchtigkeit, Pilzbefall und UV-Strahlung und als nachwachsender Rohstoff zu einem modernen Verbundwerkstoff der Zukunft. Heimische Hölzer bleiben gegenüber anderen Materialien konkurrenzfähig und gleichzeitig kann auf den Import tropischer Harthölzer weitgehend verzichtet werden. Gründe für den Aufschwung dieser neuen Holztechnologien liegen zum einen bei Lieferengpässen und Quali-

tätsschwankungen bei Tropenhölzern, zum anderen auch im steigenden Umweltbewusstsein, wie Abholzung der Regenwälder und Einsatz von chemischen Holzschutzmitteln.

Dies zeigt sich am Beispiel der Holzart Meranti aus Südostasien. Anfang der 80er Jahre war Meranti das Fensterholz schlechthin. Gute Eignung, beste Verarbeitbarkeit und die Verfügbarkeit in großen Mengen haben diese Entwicklung gefördert. Der Bauboom in den 90er Jahren führte zum Preiskampf mit dem Kunststoff-Fenster. Die Folge war ein fataler Preisverfall. Durch Maßnahmen der indonesischen Regierung wurde der Einschlag von 22,5 Mio. m<sup>3</sup> (2001) auf 5,5 Mio. m<sup>3</sup> (2005) staatlich reguliert. Bei schrumpfenden Verfügbarkeiten und einer zeitgleich steigenden Nachfrage entstand der ideale Nährboden für die rasante Entwicklung des illegalen Einschlags.

Noch heute stammen 80 % des indonesischen Holzexportes aus illegalem Einschlag. In diesem Zusammenhang kommt es auch immer öfters zu Qualitätsproblemen, da die kleinen improvisierten Sägewerke ähnlich aussehendes Holz, das aber absolut nicht als Fensterholz geeignet ist, verarbeiten. Des Weiteren werden Mischsortimente angeboten, bei denen Reste aus der Herstellung von starkem Schnittholz zu Fensterkanteln verleimt werden. Für qualitativ hochwertiges Tropenholz, das aus legalem Einschlag kommt, werden die Preise in Zukunft steigen. Somit bestehen gute Chancen für modifiziertes Holz aus einheimischen Holzarten in Konkurrenz zu Tropenholz und anderen Substitutionsmaterialien zu treten.

#### **4 Abgrenzung Modifizierung zu klassischen Holzschutzverfahren**

Das Ziel der Modifikation ist es, Veränderungen von technologischen Eigenschaften des Holzes zu erreichen. Damit grenzen sich die Modifikationsverfahren ganz eindeutig von den klassischen Holzschutzverfahren ab. Es wird kein biozider

Wirkstoff in das Holz eingebracht. Das Holz erfährt vielmehr eine Veränderung seiner chemischen Struktur und es entsteht quasi ein neuer Werkstoff.

## **5 Modifikationsgruppen**

### **5.1 Chemisch**

Der wissenschaftliche Ansatz um die natürlichen Nachteile von Holz zu beseitigen liegt darin, die Basischemie der Zellwandpolymere zu verändern. Wie die Forschung der letzten Jahre zeigt, kann die molekulare Struktur der Zellwandsubstanzen verändert werden. Die chemische Modifikation von Holz kann als eine chemische Reaktion zwischen einigen reaktiven Teilen der Holzzellwandbestandteile und einer einfachen einzelnen chemischen Substanz definiert werden, bei der es zur Ausbildung einer kovalenten Bindung zwischen den beiden Reaktionspartnern kommt.

Es wurden diverse wissenschaftliche Ansätze gewählt, um die Holzzellwand chemisch zu modifizieren. Bei der chemischen Modifizierung werden vor allem die Hydroxylgruppen in der Zellwand durch funktionelle Gruppen der mit dem Holz reagierenden Chemikalie ersetzt. Einige Verfahren sind bereits am Markt erhältlich.

Zur Gruppe der chemischen Modifikation gehören die Modifikationsverfahren Acetylierung, Furfurylierung, Melaminharzbehandlung, Holzvernetzung und die Behandlung mit siliziumhaltigen Verbindungen.

### **5.2 Thermisch**

Die thermische Behandlung von Holz zur Verbesserung ausgewählter Holzeigenschaften ist weder eine neue Idee noch eine innovative Erfindung. Der Grundgedanke stammt aus den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts. Allerdings wurden erst in den letzten 10 Jahren die Bestrebungen, Verfahren zu optimieren und praxistaugliche Produkte herzustellen, konsequent verfolgt, was in ers-

ter Linie an der geänderten Einstellung der Konsumenten zu Holz und dessen Behandlung liegt. Europaweit wurde die Forschung vorangetrieben, verschiedenste Verfahren entwickelt, patentiert und Produktionsstätten errichtet. Die thermische Modifikation von Holz ist die Modifikationsart, welche schon seit Jahren auf dem Markt erhältlich ist. Daher weist sie die höchste Produktionskapazität aller Modifikationsarten auf. Bei der thermischen Modifikation von Holz gibt es zwar unterschiedliche Prozesse, eine weitere Aufteilung in verschiedene Verfahren wird aber nicht vorgenommen.

### 5.3 Biologisch

Bei der biologischen Modifikation wird versucht das Holz mittels Organismen zu behandeln. Die mykologische Modifikation mit Weißfäuleerregern hat gute Ergebnisse gezeigt und es wird versucht diesen Prozess in Zukunft industriell anzuwenden. Weitere Verfahren die untersucht werden ist die Behandlung mit Bakterien und Enzymen.

### 6 Wirkprinzipien der Holzmodifizierung

Durch die Modifizierung von Holz kommt es immer zu einer Veränderung in der Holzstruktur. Die verschiedenen Modifikationsarten unterscheiden sich in der Wirkungsweise wie eine Veränderung der Eigenschaften erzielt wird. Dabei muss zwischen den verschiedenen Modifizierungsgruppen unterschieden werden. Nur bei der chemischen Modifikation kommt es zur Einlagerung von Stoffen und deren Reaktion mit der Zellwand. Bei der thermischen, wie auch der biologischen Modifikation kommt es nur zum Abbau bzw. teilweisen Umbau in der Zellwand.

Bei der chemischen Modifikation muss zwischen dem Ort der Einlagerung und der Wirkungsweise unterschieden werden. Da das Ziel der chemischen Modifikation eine chemische Reaktion mit Bestandteilen der Zellwand ist, kommt es immer

zu einer Einlagerung in der Zellwand. Bei manchen Verfahren kann es jedoch zusätzlich noch zu einer Füllung des Zelllumens kommen.

Bei der Wirkungsweise unterscheidet man zwischen der Reaktion mit den Hydroxylgruppen, der Vernetzung bzw. Quervernetzung der Hydroxylgruppen und der Veränderung der Zellwandstruktur. Zu einer Veränderung der Zellwandstruktur kommt es bei allen Verfahren. Jedoch unterscheiden sie sich durch Art und Weise wie dies geschieht. Eine Reaktion mit den Hydroxylgruppen ist das Ziel der chemischen Modifikation und findet bei allen Verfahren statt. Der Unterschied zwischen Vernetzung und Quervernetzung besteht darin, dass es bei der Vernetzung zur Verbindung von Hydroxylgruppen durch Einlagerung eines Stoffes kommt, während es bei der Quervernetzung durch Abbau und Umbau der Zellwand ohne Einwirkung eines Stoffes zur Verbindung der Hydroxylgruppen kommt. Es sind auch mehrere Wirkungsweisen auf einmal möglich.

Ziel aller Modifikationsarten ist es, die Hydroxylgruppen auf irgendeine Art und Weise unzugänglich zu machen, da diese für das Quell- und Schwindverhalten verantwortlich sind. Die Hydroxylgruppen sind hydrophil und lagern Wassermoleküle an. Dadurch kommt es in der unbehandelten Zellwand zur Quellung. Es gibt mehrere Arten, wie dieser Vorgang durch die Modifikation der Zellwand verhindert werden kann. (Abb. 1) Bei der Modifizierung kommt es zu einer Änderung in der Zellwand. Es wird dabei zwischen vier verschiedenen Wirkprinzipien unterschieden.

#### Abbau

Bei der thermischen Modifikation kommt es durch die Hitzeeinwirkung zu einer teilweisen Auflösung der Zellwand. Dabei wird vor allem die Hemizellulose mit ihrem hohen Anteil an Hydroxylgruppen aufgelöst. Gleichzeitig kommt es zu

einer Quervernetzung von Hydroxylgruppen, so dass keine freien Enden mehr vorhanden sind an denen sich Wasser anlagern kann. (Abb. 2)

### Pfropfung

Eine weitere Wirkungsart ist die Pfropfung, wie sie z.B. bei der Acetylierung, der Furfurylierung sowie bei der Behandlung mit siliziumhaltigen Verbindungen vorkommt. Der eingebrachte Stoff geht eine Verbindung mit den Hydroxylgruppen ein und es entsteht eine hydrophobe Endgruppe an der Zellwand. Im Prinzip macht man einen Deckel auf die gewünschte Stelle. (Abb. 3)

### Blockade

Die Behandlung mit Melaminharzen bedient sich der Blockade, indem die Harze in die Zellwand eingebracht und dort fixiert werden. Die Hydroxylgruppen werden blockiert und es kann sich kein Wasser dazwischen anlagern. (Abb. 4)

### Vernetzung

Bei der Vernetzung hat der eingebrachte Stoff mehrere Endgruppen die reaktiv sind. Dabei reagiert er mit Hydroxylgruppen verschiedener Zellwände und stellt eine Verknüpfung her. Die Zellwände werden miteinander vernetzt. (Abb. 5)

### Quellen

Abbildungen aus: Frühwald, A.; Ressel, J.B.; Bernasconi, A.: Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz, Abschlussbericht, Institut für Holzphysik und mechanische

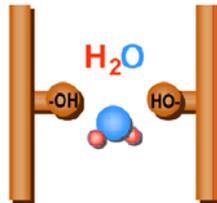


Abb. 1: Quellen und Schwinden von Holz durch Anlagerung von Wassermolekülen an den Hydroxylgruppen



Abb. 2: Teilweise Auflösung der Hydroxylgruppen durch Hitzeeinwirkung

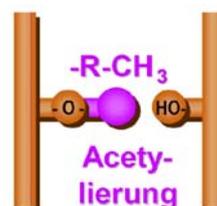


Abb. 3: Pfropfung der Hydroxylgruppen durch Verbindung mit eingebrachtem Stoff, hier beispielhaft der Acetylierung

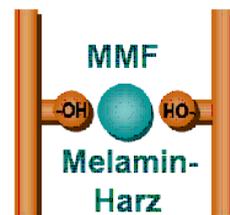


Abb. 4: Blockade der Hydroxyl-Gruppen in der Zellwand



Abb. 5: Vernetzung der Hydroxylgruppen benachbarter Zellwände

## 8.2 Modifiziertes Holz Acetylierung

### 1 Allgemeines

Bei der Acetylierung handelt es sich um ein Verfahren zur chemischen Modifizierung von Holz mittels Essigsäureanhydrid. Die chemische Veränderung findet dabei nicht nur an der Oberfläche statt, sondern gleichmäßig über den ganzen Querschnitt. Dabei kommt es zu einer Reaktion mit Teilen der Zellwand und somit zu einer Änderung der Zellwandstruktur. Die Veränderung findet ausschließlich in der Zellwand statt, es werden keine Stoffe in das Zelllumen eingelagert. Das Verfahren der Acetylierung bewirkt bei den wichtigsten Polymeren im Holz (Zellulose, Hemicellulose und Lignin) die Substituierung der Hydroxylgruppen durch Acetylgruppen. Acetylverbindungen kommen schon von Natur aus in geringer Anzahl in allen Holzarten vor.

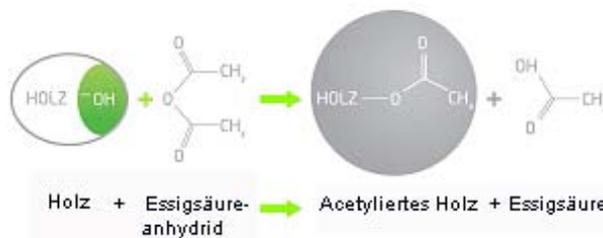


Abb. 1: Reaktionsmechanismus der Acetylierung

Ziel der Acetylierung ist es, die Anzahl dieser Verbindungen zu erhöhen. Durch diesen Austausch verändert sich die Fähigkeit des Holzes zur Aufnahme bzw. Abgabe von Wasser. Acetyliertes Holz nimmt wesentlich weniger Wasser auf als unbehandeltes Holz, da sich Acetylgruppen, im Gegensatz zu Hydroxylgruppen, hydrophob verhalten. Außerdem nimmt die „Verdaulichkeit“ des Holzes für Mikroorganismen ab. Durch die Modifizierung entsteht ein neuer Werkstoff mit verbesserten Eigenschaften. Da das Produkt durch den chemischen Prozess aber nur innerlich verändert wird, sieht es genau so aus und fühlt sich genau so an wie unbehandeltes Rohmaterial. Die Verbesserung der Eigenschaften ist dabei abhängig vom Grad der Acetylierung. Es ergeben

sich vor allem für wenig dauerhafte Holzarten mit hohen differentiellen Schwindmaßen neue Einsatzbereiche. Dementsprechend erlaubt diese Holzmodifizierung, selbst minderwertige Hölzer entscheidend aufzuwerten, so dass die Produkte sehr dauerhaft und außerordentlich formstabil sind.

Der wissenschaftliche Ansatz, Holz mit Essigsäureanhydrid zu verestern, ist keinesfalls neu. Das Verfahren wurde bereits in den 1920er Jahren unter Laborbedingungen erfolgreich angewandt. Erste Publikationen gehen auf die 50er Jahre zurück. Auch ist schon seit längerem bekannt, dass acetyliertes Holz hervorragende Materialeigenschaften besitzt. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden jedoch erst in den 90er Jahren aufgrund der Umweltdiskussion bezüglich herkömmlicher Holzschutzmittel und einer stetigen Verknappung hochwertiger Holzarten technologisch weiterentwickelt. Verschiedene Arbeitsgruppen in Europa, Nordamerika, Neuseeland und Japan haben sich mit der Acetylierung von Holz, Holzspänen und Holzfasern befasst. Das Verfahren ist seit langem bekannt und wird beispielsweise im Bereich der Textilindustrie zur Derivatisierung der Zellulose industriell umgesetzt. Das Besondere im Verfahren der Holzacetylierung ist, aufgrund der fast unveränderten Festigkeitseigenschaften, die Anwendungsmöglichkeit für Massivholz im konstruktiven Bereich. In den Niederlanden wurde seit 1991 nach intensiven Forschungen ein Verfahren zur Modifizierung von Vollholz entwickelt. Das Verfahren wurde bereits bis zur Serienreife entwickelt und acetyliertes Holz wird seit März 2007 im Handel angeboten.

### 2 Planerische Einflussfaktoren

#### 2.1 Einsatzzwecke / -gebiete

Vor allem die weiterverarbeitende Industrie (Fenster, Türen, Parkett) steht der neuen Veredelungstechnik sehr positiv gegenüber, weil sie die Versorgung mit hochwertigen Hölzern mittel- und

langfristig für problematisch halten. Außerdem stärkt der hochwertige Grundstoff die Konkurrenzfähigkeit holzbasierter Produkte gegenüber Kunststoffen und anderen Substitutionsmaterialien.



Abb. 2: Fensterkante

Besonders interessant ist der Fenstermarkt, wo Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit im modernen Fenster immer wichtiger werden. Funktionierende Lösungen wurden durch die Einbindung von externen Fachleuten entwickelt. Die Neuentwicklungen wurden unter die Maßgabe gestellt, vorhandene Systeme (speziell im Werkzeugbereich) bei der Herstellung dieser neuen Konstruktionen einzusetzen, so dass eine Markteinführung ohne große Investitionen auf Seite der potentiellen Verarbeiter möglich ist. Ob es gelingen wird, mit acetylierten Hölzern verloren gegangene Marktanteile zurückzuerobern, bleibt abzuwarten. Letzteres hängt auch sehr stark von den höheren Kosten für acetyliertes Holz ab. Durch den geringeren Wassergehalt acetylierter Hölzer haben diese im Vergleich mit herkömmlichen Laub- oder Nadelholzkanteln gleicher Dimension eine höhere Isolierwirkung. Dadurch sind dünnere Rahmenquerschnitte oder besser wärmedämmende Fenster möglich.

Ob eine Verwendung im Innenbereich als sinnvoll erscheint bleibt abzuwarten. Zum einen werden im Innenbereich keine erhöhten Anforderungen

an die Dauerhaftigkeit gestellt, zum anderen ist acetyliertes Holz vergleichsweise teuer. Lässt sich der Essigsäuregeruch nicht vollständig entfernen, schließt dies eine Verwendung im Innenbereich sowieso aus. Des Weiteren sind die Gesundheitsaspekte noch nicht ausreichend erforscht.

Aufgrund der positiven Eigenschaften von acetyliertem Holz wird in Zukunft auch mit einer großen Entwicklung bei den Holzwerkstoffen gerechnet. Zudem wird die Herstellung von WPC's aus modifizierten Holzspänen ausgiebig erforscht.

Aufgrund der verbesserten Dauerhaftigkeit scheint vor allem der Außenbereich als Einsatzgebiet interessant zu sein. Ein viel versprechender ist die Außenfassade. Viele Probleme, insbesondere mit der Dauerhaftigkeit der heutigen Holzwerkstoffe in der Fassadenanwendung könnten unter Umständen mit acetylierten Hölzern gelöst werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes eine Fassadenplatte mit dünnen acetylierten Buchenfurnieren in der Außenschicht produziert. Diese wurde in einem Bauobjekt eingesetzt und der freien Bewitterung ausgesetzt. Die Ergebnisse waren nach über einem Jahr freier Bewitterung viel versprechend. Eine Vergrauung der unbehandelten Oberfläche wird durch die Acetylierung nicht unterbunden.

Über den gesamten Lebenszyklus gesehen stellt das Verfahren eine interessante Möglichkeit dar, andere Produkte zukünftig zu substituieren. Überall dort, wo Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität trotz Feuchtigkeitskontakt gefragt sind, ist acetyliertes Holz erste Wahl und kann Hart- bzw. Tropenhölzer, aber auch Materialien wie Metall, Putz und Stein ökologisch und ökonomisch sinnvoll ersetzen.

Bisher wird acetyliertes Holz vor allem für Fenster verwendet. Das Besondere an dieser Art der Mo-

difizierung ist jedoch, dass sich das Holz auch im konstruktiven Bereich verwenden lässt. Damit hat es gegenüber anderen Modifikationsarten, wie z.B. der thermischen Behandlung, große Vorteile. Um diesem Material im konstruktiven Bereich zum Durchbruch zu verhelfen, werden in den Niederlanden zwei Schwerlastbrücken gebaut.

### 2.3 Schwerlastbrücken in Sneek, Niederlande

Die Firma Titan Wood hat im Zuge konkreter Förderung des neuen Werkstoffes und der Holzbranche von der niederländischen Regierung den Zuschlag für die Materiallieferung zum Bau von zwei Schwerlastbrücken in der Provinz Fryslan (Friesland) bekommen. Für das Projekt werden 1200 m<sup>3</sup> acetyliertes Holz, das unter dem Markennamen Accoya vertrieben wird, eingesetzt. Bei den zwei Brücken handelt es sich um die ersten Bauwerke aus acetyliertem Holz. Da bisher keine tragenden Teile aus Accoya hergestellt wurden, ist dies für alle Beteiligte Neuland.

Die auch für den Schwerlastverkehr befahrbaren Brücken werden bei Sneek die Autobahn A7 mit einer Spannweite von 32 m, einer Breite von 12 m und einer Höhe von 15 m überqueren. Entwurf und Planung stammen von den Architekten Hans Achterbosch (Achterbosch Architectuur, Leeuwarden, NL), Alex van den Beld und Haiko Meijer (Onix architecten, Groningen, NL). Der Bau der Brücken und die Herstellung der blockverleimten Brett-schichthölzer wird von der Schaffitzel Holzindustrie GmbH (Schwäbisch Hall, D) ausgeführt. Die erste Brücke soll im August 2008, die zweite 2009 fertig gestellt werden.

Die Konstruktion wird aus blockverleimtem Brett-schichtholz aus acetyliertem Holz hergestellt. Als Holzart wird Pinus radiata, eine schnell wachsende Kiefernart, verwendet. Die Hölzer sind im Rohzustand 38 mm stark, in der Breite jedoch unterschiedlich. Nach der Acetylierung werden sie auf 33 mm abgehobelt um eine plane Fläche für die



Abb.3: Modell und Entwurf Brücke Sneek

Verleimung zu erhalten. Die Verleimung acetylierter Hölzer ist nur mit Resorcinharz möglich. Bei der Montage muss darauf geachtet werden, dass es nicht zu einer Korrosion der Metallteile kommt. Deshalb werden bei diesen Brücken die Verbindungen mit eingeklebten, verzinkten Gewindestangen mit 48 mm Durchmesser hergestellt. Als Kleber wird Epoxidharz verwendet. An den Gewindestangen befinden sich Abstandhalter, so dass ein direkter Kontakt zum Holz verhindert wird. Das Epoxidharz bildet somit eine Schutzschicht zwischen Gewindestangen und Holz. Dabei handelt es sich um eine zusätzliche Schutzmaßnahme.

Für die Berechnung gibt es bisher noch keine Rechenwerte. Zurzeit werden jedoch an der MPA Karlsruhe Tests mit Brettschichtholzträgern durchgeführt. Diese Tests liefern die nötigen Ausgangsdaten für das Projekt, wie auch für die weitere Normung. Es wird davon ausgegangen, dass die Werte mindestens auf gleichem Niveau liegen evtl. sogar etwas höher ausfallen als bei gleichwertigem „normalen“ Brettschichtholz. Die Berechnung erfolgt nach DIN 1052.

Laut Titan Wood kann der konstruktive Holzschutz völlig vernachlässigt werden. Die Brücken erhalten zwar einen Anstrich dieser dient aber nur der Farbgebung und hat keine schützende Wirkung für das Holz. Dennoch wird mit einer Nutzungsdauer von 80 Jahren gerechnet. Ob die Brücken auf lange Zeit ohne Holzschutz auskommen, muss sich aber noch zeigen. Sollte dies gelingen, würden sich auf die Nutzungsdauer gesehen auch die höheren Kosten für das Holz rechtfertigen, da auf eine Bekleidung der tragenden Konstruktion und deren Wartung verzichtet werden kann.

Sollte sich das acetylierte Holz bei diesem Projekt bewähren, könnte dies zum Durchbruch im kon-

struktiven Holzbau verhelfen. Holz könnte damit in weiteren konstruktiven Einsatzgebieten eine konkurrenzfähige Alternative zu Stahl oder Beton werden.

### 3 Physikalische Einflussfaktoren

#### 3.1 Holzarten

Die Vollholz-Acetylierung lässt sich auf verschiedenste Holzarten anwenden. So können auf diese Weise nicht nur die gängigsten mitteleuropäischen, sondern auch außereuropäische Holzarten modifiziert werden. Allerdings lassen sich Laubhölzer wie Buche und Pappel gleichmäßiger acetylieren als Nadelhölzer. Es hat sich gezeigt, dass die Imprägnierbarkeit der Holzart einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat.

Buche ist in mehrfacher Hinsicht interessant. Einerseits besitzt die Buche ein besonders ausgeprägtes Quell- und Schwindmaß und zählt außerdem zu den natürlich wenig dauerhaften Holzarten. Andererseits hat sich gezeigt, dass sich Buchenholz zufriedenstellend acetylieren lässt. Buche wird in die Dauerhaftigkeitsklasse 5 eingestuft. Nach der Acetylierung erreicht sie Dauerhaftigkeitsklasse 1. Die Tatsache, dass Buche als eine der wichtigsten Laubholzarten in besonderem Maße am Aufbau der zunehmenden Mischwälder in Deutschland beteiligt ist, liefert ein weiteres Argument, um Buchenholz zu modifizieren.

Derzeit wird nur Pinus Radiata für Accoya eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine schnell wachsende Kiefernart. Das Plantagenholz ist in großen Mengen verfügbar, da es in mehreren Ländern (Chile, Südafrika, Neuseeland) im großen Umfang angebaut wird. Die langfristige Versorgung mit dieser Holzart wird als unproblematisch angesehen. Bedenken wegen der Nachhaltigkeit der Radiata-Kiefern-Plantagen bestehen nicht. Allerdings ist damit keine Wertschöpfung der europäischen Holzproduktion verbunden.

### 3.2 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte zu Beginn der Behandlung hat ebenfalls einen Einfluss auf den Verlauf der Acetylierung. Das Holz sollte darrtrocken sein wenn es acetyliert wird, da das Essigsäureanhydrid sonst nicht nur eine Reaktion mit den Hydroxylgruppen in der Zellwand eingeht, sondern auch mit dem vorhandenen Wasser zu Essigsäure umgesetzt wird. Je niedriger der Feuchtegehalt ist, desto effizienter und wirtschaftlich rentabler ist der Prozess.

## 4 Veränderung der materialtechnischen Eigenschaften

### 4.1 Wasserabsorption

Durch die Acetylierung wird die Aufnahmefähigkeit und Aufnahmegeschwindigkeit von Wasser im Holz deutlich gesenkt. Hierbei werden die hydrophilen Hydroxylgruppen im Holz durch hydrophobe Acetylgruppen ersetzt. Die markant reduzierte und damit substantiell herabgesetzte Wasserabsorptionseigenschaft spiegelt sich im verringerten Gleichgewichtsfeuchtegehalt des behandelten Holzes wieder. So nimmt die maximale Gleichgewichtsholzfeuchte mit wachsendem Acetylierungsgrad von ca. 25-30 % bei unbehandeltem Holz auf ca. 10-12 % bei einem WPG von 20 ab (WPG: weight percent gain: prozentuale Gewichtszunahme durch Einlagerung von Stoffen als Maß für den Acetylierungsgrad).

Die Acetylgruppen werden hauptsächlich in die Lignin- und Hemizellulosepolymere eingelagert. Demzufolge bestimmt die Acetylierung die Feuchtigkeitsempfindlichkeit des Holzes offensichtlich über die Lignin- und Hemizellulosepolymere der Zellwand.

### 4.2 Dimensionsstabilität

Durch Acetylierung modifiziertes Holz quillt und schwindet im Vergleich zu unbehandeltem um 60-80 % weniger. Dieser Wert trifft auf alle Holzarten gleichermaßen zu. Dabei nimmt die Dimen-

sionsstabilität mit dem Acetylgehalt in etwa linear zu. Durch die Dimensionsstabilisierung wird eine verminderte Rissbildung erreicht.

### 4.3 Dauerhaftigkeit

Pilzresistenz:

Die „Unverdaulichkeit“ des Holzes sorgt für einen hohen Widerstand gegen den Abbau durch Pilze und Bakterien. Für den Abbau durch Pilze sind unter anderem Mindestholzfeuchte und geeignete Substrate ausschlaggebend. Beide Parameter werden durch die Acetylierung entscheidend beeinflusst, da die Gleichgewichtsfeuchte auf max. 10-12 % herabgesetzt wird und mit den Hydroxylgruppen leicht angreifbare Molekülgruppen aus dem Zellverband ersetzt werden. Dementsprechend dringen bei höheren Acetylierungsgraden Pilzhypen nicht in die Holzzellwände ein und können die mikrobrillären Strukturen nicht angreifen. Außerdem verhindert die Acetylierung Insektenschäden und beugt damit wichtigen Eintrittspforten für Pilze ins Holz vor.

Durch die Acetylierung lässt sich die Dauerhaftigkeit heimischer Holzarten wie Buche, Kiefer und Pappel beträchtlich verbessern. Das Holz wird umso resistenter, je mehr Hydroxylgruppen durch stabile chemische Verbindungen ersetzt werden. Ein WPG von 12 gewährleistet in der Regel einen vollständigen Schutz. Ein WPG von 10 verhindert schon Moderfäule. Somit erreichen acetylierte Hölzer Resistenzklasse 1, das heißt, dass ihre Dauerhaftigkeit derjenigen von Teakholz entspricht oder diese übersteigt. Die Acetylierung verhindert aber nicht nur den Gewichts-, sondern auch den Festigkeitsverlust, welcher durch Braun- und Weißfäulepilze entstehen kann. Bläuepilzbefall kann allerdings durch Acetylierung nicht verhindert werden.

Hölzer die von Accoya angeboten werden, sind immer so behandelt, dass sie die höchste Dauerhaftigkeitsklasse (Klasse 1) nach DIN EN 350-2

erreichen. Die Haltbarkeit wird im oberirdischen Einsatzbereich mit 50 Jahren, bei Einsatz mit Erdkontakt mit 25 Jahren angegeben.

In den Niederlanden befand sich acetyliertes Holz 10 Jahre als Uferbefestigung an der Luft-Wassergrenze, ohne dass Schäden am Holz zu verzeichnen sind.



Abb.4:Uferbefestigung nach 10 Jahren im Einsatz

Insekten- und Termitenresistenz:

Acetyliertes Holz zeigt auch eine verbesserte Resistenz gegenüber Termitenbefall. Die Insektenresistenz wächst mit dem WPG. Frühe Versuche mit Spanplatten haben jedoch gezeigt, dass selbst beim höchstmöglichen Acetylierungsgrad nicht vollständig resistent gegenüber dem Befall von subterranean Termiten waren. Dies kann zum Teil auf die Fähigkeit der Termiten zurückgeführt werden, Essigsäure, Acetylgruppen und vielleicht auch Acetate zu verdauen.

#### 4.4 Verwitterung

Acetyliertes Holz verhält sich gegenüber Sonnenlicht und Regen nicht wie unbehandeltes Holz. Aufgrund der acetylierungsbedingt geringen Gleichgewichtsholzfeuchte werden die UV-Licht-Abbauprodukte des Lignins langsamer aus der Zellwand ausgewaschen. Intra- und intermolekulare Bindungen der acetylierten Zellwand sind stabiler, was ihre integrierte Zersetzung vermindert. Im Laufe der Zeit jedoch beseitigt die UV-Strahlung die blockierenden Acetylgruppen, und das

Holz verwittert. Allerdings kann die UV-Strahlung nicht alle Acetylgruppen entfernen, so dass sich die photochemischen Zersetzungseigenschaften geringfügig verbessern. Die UV-Verwitterung wird nicht verhindert, sondern nur verzögert.

#### 4.5 Oberflächenbehandlung

In Versuchen mit lackierten (Klarlack), acetylierten Holzoberflächen konnte nach 2 Jahren Außenwitterung eine erhöhte UV-Stabilität festgestellt werden, wodurch die Verwitterung der Oberflächen bei Außenanwendung acetylierter Holzprodukte vermindert wird. Selbst dunkle Lacke wiesen auf acetylierter Fichte und Pappel im Gegensatz zum unbehandelten Holz nach einigen Jahren noch keine Schäden auf. Offensichtlich halten Lacke auf acetyliertem Holz besser als auf Unbehandeltem. Dies wird auf die verbesserte Dimensionsstabilität des behandelten Holzes zurückgeführt. Die Beständigkeit der Oberflächenbeschichtung verbessert sich und die Wartungsintervalle können verlängert werden. Farbanstriche müssen nur noch alle 10 bis 15 Jahre und nicht mehr alle 3 bis 5 Jahre erneuert werden. Die Hersteller Glasurit und Sikkens geben 10 Jahre Garantie auf bestimmte Lacksysteme ohne Wartungsanstrich.

#### 4.6 Festigkeitseigenschaften

Die Acetylierung verändert die Festigkeitseigenschaften von Vollholz kaum. Je nach Holzart differiert der E-Modul um  $\pm 5\%$  und die Biegefestigkeit um etwa  $\pm 10\%$ . Eine Verwendung von acetyliertem Holz im konstruktiven Bereich ist problemlos möglich.

Das acetylierte Holz liegt in einem stark gequollenen Zustand vor, d.h. pro Querschnittsfläche wird weniger Fasermaterial als bei unbehandeltem, ungequollenem Holz getestet. Dementsprechend geht die Scherfestigkeit des Holzes in der Regel um 10-25% zurück. Andererseits trägt die geringere Holzfeuchte des acetylierten Holzes an-

scheinend zur Erhöhung der Druckfestigkeit bei. Des Weiteren erhöht die Acetylierung die Materialdichte um ca. 5–10 %, so dass ebenfalls mit höheren Festigkeiten gerechnet werden kann. Eine Zunahme der Härte um bis zu 30 % kann erreicht werden. Grundsätzlich vermag das Verfahren der Acetylierung es jedoch nicht, aus Weichholz Hartholz zu machen.

#### 4.7 Brandverhalten

Die Acetylierung verändert die Feuereigenschaften von lignozellulosehaltigem Material nicht. In einer thermogravimetrischen Analyse reagierten acetylierte Kiefern-Sägespäne bei definierten Temperaturen in der gleichen Weise wie unbehandeltes Material. Übereinstimmende Verbrennungstemperaturen und Sauerstoffverbräuche zeigen, dass die der Zellwand zugeführten Acetylgruppen die Zellwandpolymere nicht signifikant verändert haben. Ob bei der Verbrennung mit erhöhten Emissionen gerechnet werden muss ist noch nicht geklärt.

#### 4.8 Akustische Eigenschaften

Die akustischen Eigenschaften von dünnen Holz Furnieren werden durch die Acetylierung entscheidend verbessert. Lautsprecherboxen z.B. aus acetylierten Furnieren, lösen den Klang deutlich besser auf als herkömmliche Boxen. Für Holz, welches zum Instrumentenbau verwendet werden soll, gilt ähnliches. Die Acetylierung verringert den Feuchtigkeitsgehalt der Zellwand, wodurch die akustische und dimensionale Stabilität bei Feuchtigkeitsschwankungen erhöht wird. Die Acetylierung reduziert die Schallgeschwindigkeit um ca. 5 % und verringert ebenfalls die Klangaufnahme, nicht jedoch die akustische Umsetzungseffizienz. In welchem Maß sich die veränderten Materialeigenschaften auf Holzbauteile, wie z.B. Fassadenplatten, und deren Schalldämmmaß auswirken, muss noch untersucht werden.

#### 4.9 Klebbarkeit

Mit Hilfe handelsüblicher Phenol-Formaldehyd-Harz-Klebstoffe können Sperrholzplatten aus acetylierten Furnieren hergestellt werden, die den Anforderungen der EN 636-3 sowie der DIN 68705 Teil 3 gerecht werden. Die Herstellung von Brettschichtholz-Trägern ist gerade in der Erprobung. Zur Verleimung müssen allerdings Resorcinharzleime verwendet werden.

#### 4.10 Wärmeleitvermögen

Acetyliertes Holz weist ein geringeres Wärmeleitvermögen auf als unbehandeltes Holz. Aufgrund dieser positiven Eigenschaften eignet es sich vor allem für Fenster und Fassaden.

#### 4.11 Bearbeitung

Nachträglich entstandene Schnittkanten oder aus größeren Abmessungen entstandene Produkte müssen nicht in irgendeiner Weise nachbehandelt werden, da die chemische Veränderung nicht nur an der Oberfläche, sondern gleichmäßig über den gesamten Querschnitt stattfindet. Die maschinelle Be- und Verarbeitung ist problemlos möglich. Es kommt zu keinem erhöhten Verschleiß an Maschinen.



Abb. 5: Bearbeitetes Accoya

#### 4.12 Farbänderung

Die natürliche Farbgebung der jeweiligen Holzart wird durch die Acetylierung nicht verändert.

### 6 Produktionsanlage/ Kapazität

Die erste und bisher einzige großtechnische Acetylierungsanlage ist in Arnheim, Niederlande errichtet worden. In der Anlage, die am 31. Mai 2007 offiziell in Betrieb genommen wurde, sollen jährlich 30 000 m<sup>3</sup> Accoya-Holz produziert werden. Sie ist aber auf eine Erweiterung der Kapazität ausgelegt.

Herzstück der Fabrik sind zwei Reaktoren, die aus zwei liegenden Kesseln bestehen. Der Acetylierungsprozess stellt hohe Anforderungen an die Materialbeschaffenheit dieser Kammern. Die eingesetzte Chemikalie (Essigsäureanhydrid) ist äußerst aggressiv und der Prozess läuft unter hohem Druck und großer Temperaturentwicklung ab. Die komplizierte und aufwändige chemisch-technische Seite des Prozesses ist der Grund für die lange Zeit, die nötig war, bis aus den erfolgreichen Laborversuchen eine großtechnische Anlage entwickelt werden konnte. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge ist erhebliche Erfahrung in chemischer Prozesstechnologie erforderlich. Dies sieht man auch an den zahlreichen Anlagen, Kesseln und Rohrleitungen, welche an die zwei Reaktoren anschließen. Die Reaktoren können Chargen von 35 bis 40 m<sup>3</sup> gelatteter Bretter oder Kanteln aufnehmen.



Abb. 7: Bestückung des Reaktors

### 7 Bestimmung des Acetylierungsgrades

Durch die Einlagerung von Acetylgruppen in die Zellwand bzw. durch die Umwandlung von Hydroxylgruppen in Acetylgruppen kommt es zu einer Gewichtszunahme im Holz, da die Acetylgruppen schwerer sind als die Hydroxylgruppen. Der Acetylierungsgrad wird deshalb über die Gewichtszunahme bestimmt. Die Gewichtszunahme wird meistens mit WPG abgekürzt. WPG steht für weight percent gain. Es erlaubt somit den Anteil des eingelagerten Acetats an der Holzmasse zu quantifizieren.

Es gibt aber auch noch andere Methoden. In der Regel wird der Acetylierungserfolg auch noch durch Volumenzuwachs, Auswaschwiderstand oder IR-Spektralanalyse bzw. spektrophotometrisch oder über die Leitfähigkeit nachgewiesen. Weil die Zellulose acetylierter Zellwände im aufgequollenen Zustand vorliegt, kann der volumetrische Vergleich mit unbehandeltem Holz Hinweise auf den Acetylierungsstatus des Produkts liefern. Neben der IR-Spektralanalyse bedienen sich neuere Untersuchungen mit der Deacetylierung, HPLC-Analytik und spektrophotometrischer Eluatquantifizierung z.T. deutlich präziserer Methoden.

### 6 Produktionsanlage/ Kapazität

Die erste und bisher einzige großtechnische Acetylierungsanlage ist in Arnheim, Niederlande errichtet worden. In der Anlage, die am 31. Mai 2007 offiziell in Betrieb genommen wurde, sollen jährlich 30 000 m<sup>3</sup> Accoya-Holz produziert werden. Sie ist aber auf eine Erweiterung der Kapazität ausgelegt.

Herzstück der Fabrik sind zwei Reaktoren, die aus zwei liegenden Kesseln bestehen. Der Acetylierungsprozess stellt hohe Anforderungen an die Materialbeschaffenheit dieser Kammern. Die eingesetzte Chemikalie (Essigsäureanhydrid) ist äußerst aggressiv und der Prozess läuft unter hohem Druck und großer Temperaturentwicklung ab. Die komplizierte und aufwändige chemisch-technische Seite des Prozesses ist der Grund für die lange Zeit, die nötig war, bis aus den erfolgreichen Laborversuchen eine großtechnische Anlage entwickelt werden konnte. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge ist erhebliche Erfahrung in chemischer Prozesstechnologie erforderlich. Dies sieht man auch an den zahlreichen Anlagen, Kesseln und Rohrleitungen, welche an die zwei Reaktoren anschließen. Die Reaktoren können Chargen von 35 bis 40 m<sup>3</sup> gelatteter Bretter oder Kanteln aufnehmen.



Abb. 7: Bestückung des Reaktors

### 7 Bestimmung des Acetylierungsgrades

Durch die Einlagerung von Acetylgruppen in die Zellwand bzw. durch die Umwandlung von Hydroxylgruppen in Acetylgruppen kommt es zu einer Gewichtszunahme im Holz, da die Acetylgruppen schwerer sind als die Hydroxylgruppen. Der Acetylierungsgrad wird deshalb über die Gewichtszunahme bestimmt. Die Gewichtszunahme wird meistens mit WPG abgekürzt. WPG steht für weight percent gain. Es erlaubt somit den Anteil des eingelagerten Acetats an der Holzmasse zu quantifizieren.

Es gibt aber auch noch andere Methoden. In der Regel wird der Acetylierungserfolg auch noch durch Volumenzuwachs, Auswaschwiderstand oder IR-Spektralanalyse bzw. spektrophotometrisch oder über die Leitfähigkeit nachgewiesen. Weil die Zellulose acetylierter Zellwände im aufgequollenen Zustand vorliegt, kann der volumetrische Vergleich mit unbehandeltem Holz Hinweise auf den Acetylierungsstatus des Produkts liefern. Neben der IR-Spektralanalyse bedienen sich neuere Untersuchungen mit der Deacetylierung, HPLC-Analytik und spektrophotometrischer Eluatquantifizierung z.T. deutlich präziserer Methoden.

### 8 Wirtschaftlichkeit

Der Preis für acetyliertes Rohholz liegt gerade bei 1000 €/m<sup>3</sup> (Stand Januar 2008). Damit ist es etwa fünf Mal so teuer wie normales Nadelholz. Der Preis wird in erster Linie durch Materialkosten (Holz, Chemikalien und Energie) und hohe Anlagekosten bestimmt. Die Holzqualität stellt eine wichtige Voraussetzung für die angestrebten Produkteigenschaften und die Prozesskosten dar. Insbesondere die Holzfeuchte beeinflusst die Prozesskosten über den Chemikalienverbrauch stark, weil Wasser das Essigsäureanhydrid in Essigsäure spaltet. Die Produktkosten werden darüber hinaus durch die Zielqualität beeinflusst. So hängt der Verbrauch von Essigsäureanhydrid wesentlich vom angestrebten WPG ab. Dementsprechend steigen Kosten proportional mit der gewünschten Produktqualität. Unabhängig vom Produktionsstandard erfordert der Umgang mit Essigsäureanhydrid eine hochwertige Anlagenkonfiguration aus Edelstahl-Bauteilen.

Das korrosive Essigsäureanhydrid des Modifizierungsprozesses schließt die Verwendung herkömmlicher Imprägnieranlagen aus. Auch die Notwendigkeit der Chemikalienrückgewinnung übersteigt die Komplexität üblicher holzindustrieller Aktivitäten. Vor diesem Hintergrund muss es spezialisierte Acetylierungsbetriebe als Kooperationspartner von Holzindustrie und chemischer Industrie geben, deren Standorte wesentlich von der Möglichkeit der chemischen Produktion und der Verfügbarkeit von Essigsäureanhydrid bestimmt wird.

Der Vergleich der Folgekosten im Fensterbau mit den Vorteilen von acetyliertem Holz wie Dauerhaftigkeit, Formstabilität, UV-Resistenz und Witterungsbeständigkeit von Lacken weisen darauf hin, dass der neue Werkstoff auch höhere Einstandspreise rechtfertigt.



Abb. 8: Produktionsanlage

### 9 Ökologie

Wie unbehandeltes Holz enthält acetyliertes Holz nur Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff als chemische Bausteine und bleibt damit frei von toxischen Substanzen. Untersuchungen haben ergeben, dass acetyliertes Holz problemlos entsorgt werden kann. Ob eine thermische Verwertung möglich ist oder dabei mit erhöhten Emissionen gerechnet werden muss, ist noch unklar.

Die Acetylierung ist für sich betrachtet ein energieaufwändiger Prozess. Ein isolierter Betrieb einer Acetylierungsanlage ohne eine Chemikalienrückgewinnung ist aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll. Eine integrierte Chemikalienrückgewinnung zur Aufbereitung der verunreinigten Essigsäure (Extraktstoffe aus dem Holz) und des überschüssigen Essigsäureanhydrids vermindern nicht

nur den Energieeinsatz, sondern stellen auch eine erhebliche Risikoverminderung, durch z.B. weniger Gefahrguttransporte, dar. Trotz der oben genannten Einschränkungen ist die Acetylierung aus ökologischer Sicht ein interessantes, zukunftsweisendes Verfahren, da durch die Verbesserung der Eigenschaften der Produkte eine Substitution von mit Holzschutzmitteln behandelten Hölzern möglich ist. Die verbesserten Eigenschaften hinsichtlich der Oberflächenbehandlung mit den daraus resultierenden größeren Wartungsintervallen zeigen ebenfalls in diese Richtung.

### 10 Gesundheit

Der Einsatz von acetyliertem Holz im Innenbereich scheint derzeit nicht sinnvoll, da es zu Geruchsbelästigungen kommen kann und weitere Gesundheitsbelastungen nicht ausgeschlossen werden können. Ist die Essigsäure aus dem Holz nicht vollständig entfernt, kann diese während der Nutzungsphase unkontrolliert entweichen und zur Belastung der Raumluft (oder auch Außenluft) mit flüchtigen organischen Verbindungen (VOC's) beitragen. Im Innenbereich besteht allerdings auch keine Anforderung an eine erhöhte Dauerhaftigkeit. Auch schränken die hohen Kosten für die Behandlung die Verwendung im Innenbereich ein.

### 11 Patente

Die verfahrenstechnischen Grundlagen für den Acetylierungsvorgang basieren auf den beiden Patenten von Rowell (1987) und Militz und Beckers (1995). Dieses Acetylierungsverfahren ist für lignocellulosehaltiges Material wie Späne, Flachspäne oder Platten sowie für massives Holz verschiedener Arten und Dimensionen geeignet.

Das britische Unternehmen Accsys Technologies PLC, spezialisiert auf umweltverträgliche Verfahren und Technologien, hat den Prozess in dreizehnjähriger Forschungsarbeit zusammen mit dem Scion Research Institute, Rotorua, Neuseeland weiterentwickelt, so dass heute die kom-

merzielle Produktion von acetyliertem Holz erstmals möglich ist. Die Rechte an dem Verfahren hält die Accsys-Tochtergesellschaft Titan Wood, der zugleich Produktion, Vermarktung und Lizenzierung obliegen. Titan Wood bringt acetyliertes Holz unter dem Markennamen Accoya auf den Markt.

### Quellen

- [1] Dreimann, A.: Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit von Möbeln aus Sperrholz für den Außenbereich, Bachelor Thesis Kurzfassung, HAWK Hildesheim, 2007
- [2] Holzschutz durch Holzmodifizierung, Sachverständigenbüro für Holzschutz, 2007
- [3] Krause, A.: Neue Materialien – neue Chancen für Holzfenster?, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2007
- [4] Militz, H.: Neuartige Verfahren der Holzmodifizierung für den Fenster- und Fassadenbau, ift Rosenheim, 2003
- [5] Militz, H.: Holzmodifizierung – Alternative Schutz- und Behandlungsverfahren, 22. Holzschutztagung der DGFH, Göttingen, 2000
- [6] Militz, H.: Übersichtsbericht – Acetyliertes Holz, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2001
- [7] Militz, H.: Die Verbesserung des Schwind- und Quellverhaltens und der Dauerhaftigkeit von Holz mittels Behandlung mit unkatalysiertem Essigsäureanhydrid, Holz als Roh- und Werkstoff 49, Seite 147 – 152, 1991
- [8] Modifiziertes Holz – Eigenschaften und Märkte, Kurzfassung, Institut für Holzforschung, BOKU Wien, 2002
- [9] Richter, R.: Neue Materialien und Beschichtungen für den Oberflächenschutz, Empa, Abteilung Holz, Dübendorf 2005
- [10] Roggemann geht mit Accoya auf den Markt, Holz-Zentralblatt, Nummer 22, Seite 596, 2007

- [11] Rowell, R.: Acetylation of wood, Forest Products Journal, Vol. 56 No. 9, 2006
- [12] Teischinger, A.: Modifiziertes Holz, Institut für Holzforschung, BOKU Wien, 2003
- [13] Wepner, F.: Produktinnovationen durch Holzmodifizierung, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2005
- [14] Zimmer, B., et. al: Erprobung eines Acetylierungsverfahrens für heimische Holzarten und Holzprodukte, Zusammenfassender Bericht der Ergebnisse, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2003
- [15] Internetseite der Firma Titan Wood:  
[www.accoya.info](http://www.accoya.info)
- [16] Internetseite der Firma Roggemann:  
[www.roggemann.de](http://www.roggemann.de)
- [17] Internetseite des Architekturbüros Achterbosch: [www.achterboscharchitectuur.nl](http://www.achterboscharchitectuur.nl)

**Linkliste**

- [www.accoya.info](http://www.accoya.info)  
Acetyliertes Holz der Firma Titan Wood Limited  
Produktionsanlage in Arnheim, Niederlande
- [www.roggemann.de](http://www.roggemann.de)  
Seite der Firma Enno Roggemann  
Offizieller Vertrieb von Accoya Holz für Deutschland und Polen

## 8.2 Modifiziertes Holz Furfurylierung

### 1 Allgemeines

Ein weiteres Verfahren der chemischen Modifikation von Holz ist die Behandlung mit veredeltem bzw. polykondensiertem Furfurylalkohol. Furfurylalkohol (FA) ist eine erneuerbare Chemikalie, die aus Pflanzenabfällen in der Industrie, z.B. bei der Zuckerfabrikation oder anderen landwirtschaftlichen Biomasseprodukten wie Maiskolben oder Sonnenblumen abgeleitet wird. Gebräuchlichster Ausgangsstoff ist Bagasse. Bei der industriellen Zuckerfabrikation bleiben neben dem Saft der Pflanze große Mengen faseriger Bestandteile übrig, diese werden Bagasse genannt.

Bei der Furfurylierung wird die Holzstruktur chemisch verändert. Es kommt dabei sowohl zu einer Füllung der Zellwand wie auch des Zelllumen. In der Zellwand findet eine Reaktion mit den Hydroxylgruppen statt was zu einer Änderung der Zellwandstruktur führt.

Die Furfurylierung verbessert hauptsächlich die Festigkeitseigenschaften und die Dauerhaftigkeit durch eine erhöhte Dimensionsstabilität und Pilzresistenz. Furfuryliertes Holz ist so gut wie instandhaltungsfrei und zeichnet sich dadurch für den Einsatz im Freien aus.

Die Firma Wood Polymer Technology (WPT) aus Norwegen hat das Verfahren der Furfurylierung von Holz entwickelt und patentieren lassen. Die weltweite Vermarktung und Lizenzierung erfolgt durch die Kebony Products DA, einer Tochtergesellschaft der WPT. Große Verwendung findet es hauptsächlich in den nordischen Ländern, Kanada und USA. In Deutschland ist furfuryliertes Holz noch nicht auf dem Markt erhältlich. Das modifizierte Holz wird unter dem Markennamen Kebony vertrieben. Hauptsächlich werden die Holzarten Buche, Esche und Kiefer modifiziert. Der Prozess wird von WPT auch als Kebonierung bezeichnet. Die Produkte wurden seither als Visor-Wood und Kebony bezeichnet und unterschieden

sich durch Holzart und der eingelagerten Menge an Furfurylalkohol. In der Zwischenzeit werden alle Produkte als Kebony bezeichnet und man unterscheidet zwischen Vollkebonierung, also der Behandlung über den ganzen Querschnitt wie bei Esche und Buche, und teilweiser Kebonierung, wie bei Kiefer, bei der lediglich der Splintholzbereich behandelt werden kann.

Die ersten Untersuchungen zur Modifizierung von Holz mit Furfurylalkohol wurden bereits in den 50er Jahren durchgeführt. Vor dem Hintergrund, durch die dunkle Färbung des furfurylierten Holzes einen Ersatz für bestimmte Tropenhölzer zu schaffen, wurden intensive Forschungsarbeiten Ende der 90er Jahre durchgeführt. Diese patentierte Modifizierungsmethode wurde über mehr als 10 Jahre durch Forschung und Entwicklung weiterentwickelt.

### 2 Einsatzgebiete

Aus furfuryliertem Holz sind Fassadenprofile, Terrassen- und Kaibeläge, Profile zur Dacheindeckung, Konstruktionshölzer sowie Bodenbeläge und Bekleidungen für Yachten erhältlich.

Aufgrund seiner Eigenschaften eignet sich furfuryliertes Holz vor allem für Außenanwendungen bei denen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Verrottung, Pilzbefall, Termiten, holzbohrende Meeresorganismen und Larven gefragt ist. Daher wird dieses Holz meist für Bekleidungen, Bohlenbeläge, Masten, im Garten- und Landschaftsbau, für Piers und Fenster verwendet. Besonders zu erwähnen ist die Verwendung als Dachbekleidung, wie sie in den nordischen Ländern oft verwendet wird. Nach Angaben des Herstellers ist das Holz fast instandhaltungsfrei und erfordert neben der normalen Reinigung keine weitere Pflege. Es wird von einer Haltbarkeit von 30 Jahren ohne Wartung ausgegangen [2].



Abb. 1: Einsatzgebiete von furfuryliertem Holz [3]

Durch seine dunkle Farbe wird es auch im Innenbereich als Substitutionsmaterial für tropische Harthölzer verwendet und für Fußbodenbeläge, Möbel, Fenster und Türen eingesetzt.

Durch die Kombination aus erhöhter Abriebfestigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Meerestorganismen und Meerwasser und seiner dunklen Farbe wird es bereits auch im Yachtbau eingesetzt.

Der Einsatz als Konstruktionsholz beschränkt sich auf den Bau von Schallschutzwänden, Uferbefestigungen, etc. Die Verwendung des Holzes für tragende Bauteile ist nicht bekannt.

### 3 Veränderung der materialtechnischen Eigenschaften

Die Veränderung der materialtechnischen Eigenschaften ist abhängig vom Grad der Furfurylierung.

#### 3.2 Dimensionsstabilität

Infolge einer reduzierten Ausgleichsfeuchtigkeit nehmen die Quellung und Schwindung um 30 bis 80 % im Vergleich zu unbehandeltem Holz ab. Je höher die Furfurylierung desto besser ist die Dimensionsstabilität.

#### 3.3 Dauerhaftigkeit

Mit zunehmendem Furfurylalkoholgehalt im Holz steigt auch seine Dauerhaftigkeit. Kiefernspintholz erreicht laut Angaben des Herstellers bereits nach der Furfurylierung mit geringen Chemikalienkonzentrationen die Dauerhaftigkeitsklasse 1 bis 2 nach EN 350-1 und ist somit mit Teak und Iroko vergleichbar.

Zudem hat es eine gesteigerte Resistenz gegenüber Termiten, Insekten und holzbohrenden Meeresorganismen. Eine über achtjährige Testphase hat gezeigt, dass dieses Holz sowohl im Außenbereich als auch im Meerwasser eine lange Lebensdauer hat [3].

Infolge einer reduzierten Ausgleichsfeuchtigkeit und der veränderten chemischen Holzstruktur wird eine verbesserte Pilzresistenz erzielt.

Die Widerstandsfähigkeit gegenüber Säuren und Laugen wird verbessert.

#### 3.4 Verwitterung

Mit der Zeit wird auch furfuryliertes Holz silbriggrau. Es ist aber auch ohne Oberflächenbehandlung ebenso dauerhaft. Langjährige Tests haben gezeigt, dass es eine lange Lebensdauer im Außenbereich und auch im Erdkontakt hat [3].

### 3.5 Oberflächenbehandlung

Die Oberfläche kann problemlos mit Lacken, Farbe oder Öl behandelt werden.

### 3.6 Festigkeitseigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften werden auch bei hohem Modifizierungsgrad nur gering beeinflusst. Die Brinellhärte und Biegefestigkeit steigen mit zunehmendem Furfurylalkoholgehalt leicht an. Es kann eine Härte von bis zu 9 HB erreicht werden. Die Bruchschlagzähigkeit wird um 20 bis 40 % reduziert.

### 3.7 Brandverhalten

Kebony hat eine 10 bis 30 % höhere Verbrennungsenergie als unbehandeltes Holz. Mit erhöhten Emissionen ist nicht zu rechnen, da das Holz nachweislich thermisch verwertet oder auch als Feuerholz verwendet werden kann [3].

### 3.8 Farbänderung

Das behandelte Holz erhält je nach Holzart und Beladung eine braune bis schwarze Verfärbung.

### 3.9 Bearbeitbarkeit

Die maschinelle Bearbeitbarkeit ist aufgrund der gesteigerten Härte mit der Bearbeitung von Hartholzern vergleichbar.

### 3.10 Änderung der Masse

In Abhängigkeit von der eingelagerten Menge an Furfurylalkohol erhöht sich die Masse. Bei niedrig furfuryliertem Holz beträgt die Gewichtszunahme 30 bis 40 %, bei stark furfuryliertem Holz 100 %.

## 4 Ökonomie

### 4.1 Prozess

Der Prozess der Firma Kebony Products DA hat Ähnlichkeiten mit Prozessen wie sie in üblichen Imprägnieranlagen angewandt werden. Es handelt sich um einen geschlossenen Prozess bei dem die nach der Behandlung noch übrigen Chemikalien zurückgeführt, aufbereitet und wie-

der verwendet werden. So ist sichergestellt, dass keine Chemikalien in die Umwelt gelangen können. Zuerst wird für 30 bis 60 Minuten ein Vakuum erzeugt um die Luft aus dem Holz zu entfernen. Dann wird unter einem Überdruck von 10 bar über 2 Stunden die wässrige Lösung mit dem Wirkstoff in das Holz eingebracht. Es folgt ein Nachvakuum um überschüssige Lösung zu entfernen. Damit eine Aushärtungsreaktion im Holz stattfindet, also die wässrige Lösung mit der Zellwand reagiert wird die Behandlungskammer durch Einblasen von Wasserdampf auf 80 bis 140 °C erwärmt. Diese Phase dauert 6 bis 8 Stunden. Zum Schluss erfolgt die Trocknung des Holzes. Dieser Schritt ist wichtig um Emissionen zu minimieren. Das Holz wird noch einem Reinigungsprozess mit Gasen unterzogen um die letzten Emissionen die durch den Prozess entstanden sind zu entfernen.

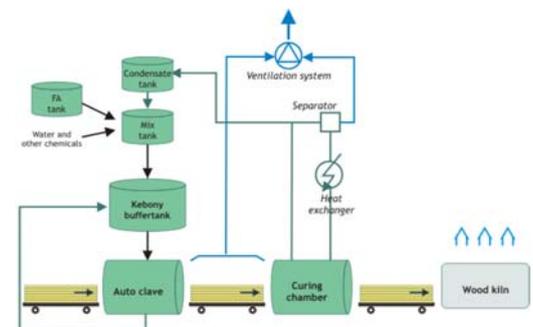


Abb. 2: Schema Produktionsprozess [3]

### 4.2 Anlagen, Kapazität

2000 wurde in Litauen die erste kommerzielle Anlage zur Produktion von furfuryliertem Holz mit einer Jahreskapazität von 500 m<sup>3</sup> eingeweiht. 2003 betrug die Fertigungskapazität rund 5.500 m<sup>3</sup>/a mit jeweils einer Anlage in Norwegen und Litauen. 2004 wurde die Produktion mit weiteren Anlagen auf 15 000 m<sup>3</sup>/a ausgebaut. Mit einer neuen Anlage die Anfang 2008 in Betrieb gegangen ist soll die Kapazität auf insgesamt 17 000 m<sup>3</sup>/a gesteigert werden. Geplant ist die weltweite Vermarktung durch den Bau weiterer Fertigungsanlagen.



Abb. 3: Produktionsanlage [13]

#### 4.3 Produkte

Furfuryliertes Holz wird unter dem Produktnamen Kebony auf dem Markt angeboten. Bisherige Produkte sind Fassadenprofile, Belaghölzer für Terrassen, Kais und Yachten, Profile zur Dacheindeckung und Konstruktionshölzer.

Konstruktionshölzer sind bis zu den Abmessungen 19,8 cm x 4,8 cm, 14,3 cm x 7,3 cm und 9,8 cm x 9,8 cm erhältlich.

#### 4.4 Ökonomie

Aufgrund der guten Verfügbarkeit des umweltfreundlichen Ausgangsstoffs bietet sich die Modifikation von Holz mit Furfurylalkohol an.

Durch den Einsatz von furfurylitem Holz im Außenbereich ohne eine weitere Oberflächenbehandlung sowie den Wegfall weiterer Instandhaltungskosten scheint diese Modifizierungsart gegenüber anderen Materialien langfristig ökonomisch konkurrenzfähig zu sein. Aufgrund der relativ kurzen Verfügbarkeit auf dem Markt sind noch keine Langzeitergebnisse vorhanden.

#### 5 Ökologie

Für die umweltfreundliche Herstellung von modifiziertem Holz bekam WPT mehrere Auszeich-

nungen. So ist es nach dem Ökolabel der nordischen Länder „The Swan“ in der Kategorie widerstandsfähiges Holz für den Außengebrauch zertifiziert. Des Weiteren wurde dem Unternehmen der norwegische Nationalpreis für nachhaltigen Verbrauch und nachhaltige Produktion verliehen und von der European Environmental Press (EEP) mit dem EEP Award in der Kategorie umweltfreundliche Holzmodifikation ausgezeichnet.

Die EU hat die ökologischen Aspekte von Hölzern die nach dem Kebony-Prozess hergestellt wurden bewertet. Das Ergebnis war, dass die Widerstandsfähigkeit des Holzes nicht auf einer toxischen Behandlung beruht sondern durch die Modifikation der Zellwand erreicht wird. Beruhend auf diesem Ergebnis fallen die Produkte nicht unter die Biozidrichtlinie der EU.

Die Entsorgung von furfuryliertem Holz ist problemlos und kann auch verbrannt werden. Es wurde durch Untersuchungen nachgewiesen, dass es nicht zu erhöhten Emissionen bei der Verbrennung kommt [3].

#### 6 Gesundheit

Um bei Verwendung im Innenbereich eine gesundheitsschädigende Wirkung auszuschließen werden VOC-Tests entsprechend ENV 717-1 und ENV 13419-1 durchgeführt [3].

#### 7 Patent

Gezielte Forschungen, um Holz mit einer umweltfreundlichen Methode zu modifizieren, wurden die letzten zwei Jahrzehnte unter der Leitung von Professor Dr. Marc H. Schneider an der Universität von New Brunswick durchgeführt. Dr. Schneider gründete mit weiteren Personen die Firma Wood Polymer Technology (WPT) um die Technologie kommerziell zu vertreiben. Der Prozess wurde weiterentwickelt und patentiert. 2000 wurde der Chemblock Industries AS eine Unterlizenz für die USA und Kanada erteilt. Das erste

Lizenzabkommen für eine Produktion im großtechnischen Maßstab wurde im gleichen Jahr der Agder Polytre AS zugeteilt. Diese produzierte in Litauen Werkstoffe für die Firma Boen AS. 2002 wurde diese Lizenz an Boen AS übertragen.

2003 wurde dann offiziell die Firma Kebony Products DA gegründet, eine 100 % Tochtergesellschaft der WPT. Die Aufgabe von Kebony Products DA ist die Vermarktung und Weiterentwicklung dieser Behandlungsmethode während sich WPT mit der Entwicklung weiterer umweltfreundlicher Behandlungstechnologien beschäftigt. Zudem erwarb WPT die Rechte des geistigen Eigentums an der Technologie, einschließlich der eingereichten und bewilligten Patente von Dr. Schneider und der Universität von Brunswick.

WPT besitzt seit 2004 auch die Mehrheitsbeteiligung an der Modified Wood Corporation (ehemals Chemblock Industries).

### Quellen

- [1] EU-Entscheidungen zur Abgrenzung der Biozid-Produkte gegenüber anderen Rechtsbereichen, 2004
- [2] Hoffrogge, C.: Hart und Wetter beständig wie Alu? – Modifiziertes Holz mit neuen Materialeigenschaften, Manuskript zur Sendung Leonardo – Wissenschaft und mehr, WDR5, Sendedatum: 04. November 2005
- [3] Internetseite der Kebony Products DA, <http://www.kebony.com/ger/>
- [4] Kebony – Material safety data sheet, Kebony Products DA, 2007
- [5] Kebony ASH – Product data sheet, Kebony Products DA, 2007
- [6] Krause, A.: Neue Materialien – neue Chancen für Holzfenster?, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2007
- [7] Krause, A.: Innovation durch Holzmodifizierung, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen

- [8] Lande, S.; Eikenes, M.; Westin, M.; Schneider, M.: Changes in mechanical properties of furfurylated wood, Wood Polymer Technologies, 2005
- [9] Malmanger, N.: Modificación de la madera con alcohol de furfuryl, Boletín de información técnica No. 225, 2003
- [10] Militz, H.: Neuartige Verfahren der Holzmodifizierung für den Fenster- und Fassadenbau, ift Rosenheim, 2003
- [11] Wepner, F.: Produktinnovationen durch Holzmodifizierung, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2005
- [12] Westin, M.; Larnoy, E.; Lande, S.: Wood furfurylation process development, 2007
- [13] Westin, M.; Lande, S.: Furfurylation of wood, Wood Polymer Technologies, 2004

### Linkliste

<http://www.kebony.com/ger/>  
Internetseite der Kebony Products DA



## 8.2 Modifiziertes Holz Melaminharzbehandlung

### 1 Allgemeines

Der Einsatz von Kunstharzen und natürlichen Harzen zur Holzmodifizierung wird schon seit vielen Jahrzehnten untersucht. Bereits 1970 veröffentlichte Burmester eine ausführliche Übersicht der anwendbaren Harze. Das Augenmerk der meisten Behandlungen richtete sich auf die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften oder der Oberflächenhärte. Zu Beginn der 90er Jahre wurde mit dem Hintergrund der Tropenholzdiskussion die Forschung der Kunstharzimprägnierung wiederbelebt. In Europa unter anderem durch Forschungsprogramme der EU, die nun jedoch nicht ausschließlich die Verbesserung der Festigkeitseigenschaften, sondern auch die Erhöhung der Dauerhaftigkeit und die Prozessoptimierung zum Ziel hatten.

Bei den heute verwendeten Harzen zur Modifizierung von Holz handelt es sich um N-Methylolverbindungen, die in gelöster oder flüssiger Form genutzt werden. Als besonders geeignet haben sich Melaminharz und DMDHEU (Dimethyloldihydroxyethyl-urea) erwiesen. Die Behandlung mit DMDHEU wird als Holzvernetzung bezeichnet und ist mit dem Verfahren der Melaminharzbehandlung vergleichbar. Die Harzbehandlungen zielen dabei auf einen kombinierten Effekt ab, da sich gezeigt hatte, dass sich bei optimierten Prozessbedingungen die Resistenz des Holzes deutlich verbessern lässt und sich zugleich einige andere wichtige Holzeigenschaften wie z.B. Dimensionsstabilität oder Lichtstabilität verbessern.

Zur Modifizierung von Holz werden methanolveretherte Melamin-Formaldehyd-Harze (MMF-Harze) verwendet, die durch die Umsetzung von Melamin mit Formaldehyd und Methanol hergestellt werden. Melamin selbst ist ein feines, weißes Pulver, das heute durch chemische Prozesse aus Harnstoff gewonnen wird. Es wird vielseitig eingesetzt und dient hauptsächlich als Rohstoff

für Melamin-Formaldehyd- und Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze. Man verwendet es aber auch als Zementadditiv oder als Flammhemmer in PU-Weichschäumen. Als Harz kommt es vor allem als Leim für Spanplatten und Holzwerkstoffe zur Anwendung. Darüber hinaus werden mit Melaminharz getränkte Papiere als Deckdekore für Arbeitsplatten und Laminat verwendet oder zur Nassfestausrüstung von Papier wie z.B. Banknoten.

Für die Holzbehandlung verwendet man Vorkondensate die in Wasser emulgiert sind und ins Holz über das Vakuum-Druck-Verfahren eingebracht werden. Bei Temperaturen von über 90 °C härten sie aus und werden so dauerhaft im Holz fixiert. Als farblose Lösung besitzt das Melamin dabei einen wesentlichen Vorteil gegenüber den braunen Phenolharzen. Es zeichnet sich insbesondere durch seine Härte, Kratzfestigkeit, UV-, Witterungs-, Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit aus. Aufgrund dieser positiven Eigenschaften wird Melamin auch für die Modifizierung von Holz verwendet. Als Melamin-Formaldehyd kann es in die Zellwand eindringen und dort mit Hydroxylgruppen der Zellwandpolymere kovalente Bindungen bilden oder direkt in den Zelllumen kondensieren.

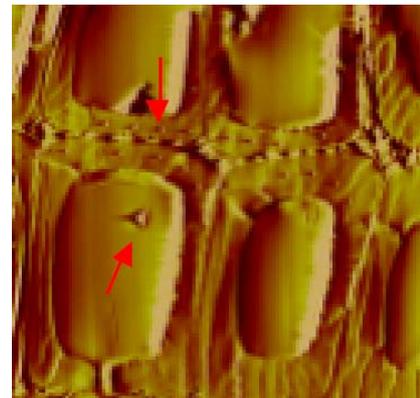


Abb. 1: Einlagerung des Harzes in der Zellwand und im Zelllumen [10]

## 2 Einsatzgebiete

Durch die deutliche Erhöhung der Härte und Abriebfestigkeit bietet sich mit Melaminharzen vergütetes Holz vor allem für den Einsatz im Parkettbereich an.

Der erhöhten Dauerhaftigkeit und verbesserten UV-Beständigkeit stehen bei Verwendung im Außenbereich die erhöhte Rissbildung gegenüber. Daher müsste für eine Verwendung im Außenbereich z.B. als Außenmöbel, Fenster oder Tür ein Weg gefunden werden, die Rissbildung zu minimieren.

Die Modifizierung von Buche für den Einsatz im Außenbereich erscheint nicht sinnvoll, da die doppelte Einbringmenge von MMF-Harz gegenüber Kiefernholz benötigt wird um eine deutliche Erhöhung der Dauerhaftigkeit zu erzielen. Besser geeignet für den Außengebrauch scheint Kiefern-splintholz zu sein, bei dem Dauerhaftigkeitsklasse 1 erreicht werden kann. Aber auch hier müsste eine Lösung für das Problem der Rissbildung gefunden werden.

Mit Melaminharz behandeltes Holz würde sich im Rahmen einer stofflichen Verwertung als hochwertiges Spanplattenrohmaterial anbieten. Die Modifizierung von Holz für die Herstellung von hochwertigen Plattenwerkstoffen ist möglich. Entscheidendes Kriterium hierfür werden jedoch die Kosten für die Modifikation im industriellen Maßstab sein.

## 3 Physikalische Einflussfaktoren

Die Behandlung ist holzartenabhängig und nicht jedes Holz ist tränkbar. Eine Behandlung von Buche mit Rotkern ist beispielsweise, aufgrund der vorhandenen Gefäßverschlüsse nicht möglich, während sich „weißes“ Buchenholz dagegen leicht imprägnieren lässt. Auch die Einbringmenge ist von der Holzart abhängig. Es gibt keine

einheitliche Einbringmenge, da z.B. bei verschiedenen Pilzen unterschiedliche Einbringmengen die besten Ergebnisse erzielen. Es führt also nicht die höchste Einbringmenge zum jeweils besten Ergebnis.

## 4 Veränderung der materialtechnischen Eigenschaften

### 4.1 Sorptionsverhalten

Das Sorptionsverhalten wird durch die Behandlung verändert. Die Aufnahme flüssigen Wassers wird beträchtlich verzögert. Die Sorptionsisothermen von behandeltem und unbehandeltem Holz im Bereich zwischen 0 und 76 % relativer Luftfeuchte unterscheiden sich jedoch nicht. Erst zwischen 76 und 100 % relativer Luftfeuchte tritt eine deutliche Sorptionsvergütung ein.

### 4.2 Dimensionsstabilität

Die Dimensionsstabilität gegenüber unbehandeltem Holz kann durch eine Harzbehandlung um ca. 12 bis 16 % bei Kiefern-splintholz verbessert werden. Bei farbkernfreiem Buchenholz liegt die zu erwartende Reduzierung des Quell- und Schwindverhaltens im Vergleich zu unbehandeltem Holz selbst bei einer hohen Konzentration von 30 % Festharzanteil nur bei 15 %. Erreicht wird dies durch die Einlagerung von Melamin in hohem Maße in die Zellwand. Die Verbesserung ist abhängig von der Harzkonzentration. Behandlungen mit Tränklösungen mit geringen Harzkonzentrationen führen nicht zu einer nennenswerten Reduzierung der Holzfeuchte, jedoch zu einer verzögerten Wasseraufnahme und –abgabe.

Die Ausgleichsholzfeuchte wird minimal reduziert.

### 4.3 Dauerhaftigkeit

Mit Hilfe der Melaminbehandlung zeigen Holzproben aus Kiefern-splintholz deutlich geringere Abbauraten gegenüber Weiß- und Braunfäule. Untersuchungen zeigten, dass heimisches Kie-

fernsplintholz, das nach DIN EN 350-2: 1994 der Dauerhaftigkeitsklasse 5 (nicht dauerhaft) zugeteilt ist, nach einer Vergütung mit 10 %iger Harzlösung Dauerhaftigkeitsklasse 1 (sehr dauerhaft) erreichen kann. Allerdings war bei Tests im 2. Jahr der Freilandbewitterung an nahezu gleichviel Tagen die Grenzholzfeuchte von 25 % überschritten, wie bei unbehandelten Proben. Die überproportionale Steigerung der Grenzfeuchteüberschreitungen vom ersten zum zweiten Jahr, die sich teilweise mehr als verdoppelte, trat gleichzeitig mit verstärkter Rissbildung auf. Die Modifizierung des Holzes erfolgt über den ganzen Querschnitt und nicht nur an der Oberfläche. Daher hat die Rissbildung keine Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit. Buchenholz benötigt ungefähr die doppelte Menge an MMF-Harz, die Kiefernholz benötigt, um eine deutliche Erhöhung der Dauerhaftigkeit zu erreichen. Die erhöhte Resistenz gegenüber holzerstörenden Pilzen wird auf chemisch-physikalischen-mechanischen Schutz vor Aufspaltung des Verbundes der Zellwandbestandteile zurückgeführt. Zum Schutz vor Bläue- und Schimmelpilzen ist ein Anstrich erforderlich.

#### 4.4 Verwitterungseigenschaften

Durch die Melaminharzvergütung wird die Vergrauung und Verwitterung der Holzoberfläche mit steigender Konzentration verzögert. Wobei bereits bei einer Imprägnierung mit 7,5 %iger Tränklösung kaum noch delignifizierte Zellulosefasern während der Freilandversuche auftraten. Die Vergrauung setzte im Vergleich zu unbehandeltem Holz sehr viel später ein. Die Proben behielten etwa ein Jahr lang ihre ursprüngliche Farbe von fälltischem hellem Kiefernholz. Dies bedeutet, dass das UV-stabile Melaminharz eine UV-schützende Wirkung auf das Holz ausübt.

#### 4.5 Festigkeitseigenschaften

Während sich der E-Modul in Abhängigkeit der Harzlösung um 3 % bei 10%iger Harzlösung und

um 16 % bei 20%iger Harzlösung erhöht, reduziert sich die Bruchschlagzähigkeit um 30 bis 37 %.

Härte und Abriebwiderstand von mit MMF-Harz getränktem Holz steigen deutlich an. Es ergaben sich Erhöhungen der Härte um bis zu 150 %. Die Erhöhung der Härte ist abhängig von der Eigenhärte des Vergütungsmittels, dem Beladungsgrad und der Tränkmittelverteilung im Holz. Mit Melaminharz vergütetes Holz ist härter als unvergütetes Holz mit gleicher Rohdichte, da Melaminharz eine höhere Eigenhärte als die Zellwandsubstanz aufweist. Mit MMF-Harzen getränktes Kiefern- und Buchenholz zeigen deutlich höhere Härten als Parkettholzarten.

#### 4.6 Änderung Farbe

Melaminharze sind farblos. Somit ist mit MMF-Harzen vergütetes Holz farblich nicht von unbehandeltem Holz unterscheidbar.

#### 4.7 Änderung Masse

Durch die Einlagerung von Stoffen ins Holz kommt es je nach Behandlungsgrad zu einer Gewichtszunahme von bis zu 40 %. Die Gewichtszunahme ist abhängig vom Festkörpergehalt der Tränklösung. Bei Tränklösungen aus dem mit Wasser auf 5–10 % Feststoffgehalt verdünnten methylveretherten Melaminharz beträgt die Gewichtszunahme ca. 10 %.

#### 5 Vorgang der Modifizierung

Das Verfahren der Melaminharzbehandlung von Holz ist mit der Holzvernetzung vergleichbar. Bei der Behandlung wird eine Einlagerung von etwa 10 % Melaminharz angestrebt, was zu einer deutlichen Hydrophobierung des Holzes führt. (Abb. 2)

Die Lösung wird über das Vakuum-Druck-Verfahren in das Holz eingebracht. Über ein Anfangsvakuum wird die im Holz befindliche Luft

entfernt. Im Anschluss wird der Kessel mit der verdünnten Tränklösung geflutet und mit ca. 8 bar Überdruck über mehrere Stunden in das Holz eingepresst. Die Aushärtung des Harzes und damit die Fixierung im Holz findet bei Temperaturen zwischen 90 und 140 °C statt. Zwischen Imprägnierung und Härtung ist eine schonende Trocknung notwendig, da es bei sofortiger Temperaturerhöhung durch ein hohes Feuchtgefälle zu Rissen im Holz kommen kann. Die Aushärtetemperatur hat einen deutlichen Einfluss auf das spätere Verhalten. Bei zu niedrigen Temperaturen kommt es nicht zu einer vollständigen Aushärtung. Die Harze werden sowohl in die Zellwand als auch in das Zelllumen eingelagert.

Die eingesetzten MMF-Harze sind einkomponentig und härten erst durch spätere Hitzeeinwirkung mit Hilfe der im Holz vorhandenen, katalytisch wirkenden, organischen Säuren aus. Zweikomponentige Reaktionsharze würden beträchtliche Mengen an Harz außerhalb des Holzes aushärten und große Mengen Abfall und Kosten verursachen. Die Tränklösung besteht, je nach Anwendungszweck, aus dem mit Wasser auf 5–10 % Feststoffgehalt verdünnten methyilveretheren Melaminharz. Sowohl die Löslichkeit der Harze in Wasser, als auch die Topfzeit (Verarbeitungszeit) ist vom Formaldehydanteil abhängig. Je höher der Formaldehydanteil, desto länger ist zwar die Zeitspanne bis sich das Harz komplett im Wasser löst aber desto höher ist auch die Topfzeit. Bei den veretheren Melamin-Formaldehyd-Harzen handelt es sich um niedermolekulare Vorcondensate. Bei der Herstellung wird die Kondensation mit Formaldehyd nur bis zu einer bestimmten Stufe vorgenommen, da die MMF-Harze zunächst noch gute Löslichkeitseigenschaften besitzen müssen. Erst nach der Einbringung ins Holz wird die Kondensation zu Ende geführt und die Harze somit unlöslich im Holz fixiert. Die Endkondensation, also die Härtung, wird durch Hitzeeinwirkung erreicht.



Abb. 2: Blockade der Hydroxyl-Gruppen in der Zellwand [1]

### 6 Ökonomie

Für die Druckimprägnierung im industriellen Maßstab wird ca. die doppelte Menge an Tränklösung im Druckkessel benötigt wie vom Holz aufgenommen wird. Daher ist die physikalische, chemische und biologische Stabilität der eingesetzten Tränklösung von Bedeutung, da die Harzlösung, welche nicht vom Holz aufgenommen wurde in Kontakt mit dem Holz und seinen teilweise löslichen Inhaltsstoffen wie Zuckern, Säuren sowie möglichen Verunreinigungen, Sporen und anderen Mikroorganismen kommt. Die Lösung muss in der Lage sein, diese Einwirkungen abzupuffern, um stabil für den weiteren Praxiseinsatz bzw. weitere Tränkvorgänge zu bleiben. In Versuchen wurde festgestellt, dass höher konzentrierte Lösungen dazu durchaus in der Lage sind, niedrig konzentrierte Lösungen jedoch Stabilitätsprobleme hatten.

Tränklösungen aus MMF-Harzen bieten sich aufgrund der niedrigen Viskosität, dem guten Eindringvermögen und der guten Verteilung im Holz für die Modifizierung an. Hinzu kommt die gute Fixierung im Holz. Es findet nahezu keine Auswaschung statt.

Für die Imprägnierung können übliche Kesseldruckanlagen, die auch für chromatfreie Holzschutzmittel wie CuHDO ausgelegt sind, verwendet werden. Durch eine Beschichtung können ältere Kessel nachgerüstet werden um die fehlende korrosionsschützende Wirkung chromathaltiger Holzschutzmittel auszugleichen. Die Trocknung und Härtung in gängigen Trock-

nungsanlagen ist möglich. Für die Modifikation von Holz mit Melaminharz werden keine speziellen Anlagen benötigt. Es können Anlagen, wie sie in der Holzindustrie bereits vorhanden sind verwendet werden. Daher bietet sich eine kommerzielle Umsetzung an. Zum jetzigen Zeitpunkt sind noch keine Produkte aus Melaminharz behandeltem Holz auf dem Markt erhältlich.

Die Kosten für die Vergütung mit methanolveretherten Melamin-Formaldehyd-Harzen liegen nach Rapp bei ca. 250 €/m<sup>3</sup> [1].

### 7 Ökologie

Mit Melaminharz modifiziertes Holz kann unbedenklich entsorgt werden, da das Holz keine Biozide enthält sondern nur Elemente wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff, die es auch schon von Natur aus enthält. Eine thermische Verwertung ist nach der 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) in dafür zugelassenen Anlagen möglich [1]. Dies bedeutet, dass bei der Verbrennung modifizierten Holzes keine erhöhten Emissionen entstehen. Wenn die Hölzer zerkleinert werden ist auch eine Kompostierung möglich. Es ist biologisch durch Bakterien abbaubar. Des Weiteren ist eine stoffliche Verwertung als hochwertiges Spanplattenrohmaterial möglich.

### 8 Gesundheit

Das behandelte Holz sowie das ausgehärtete Harz ist lebensmittelverträglich. Melaminharz ist ein toxikologisch unbedenklicher Kunststoff, der in Deutschland für Kinderspielzeug, Küchengeräte sowie Essgeschirr zulässig ist und auch als Beschichtung für Küchenarbeitsplatten verwendet wird.

### Quellen

- [1] Frühwald, A.; Ressel, J.B.; Bernasconi, A.: Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz, Abschlussbericht, Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes, Hamburg, 2003
- [2] Götz M.; Illner M.; et al.: Einheimisches, dimensionsstabilisiertes Holz im Fenster- und Fassadenbau, Kurzbbericht, isp Rosenheim
- [3] Holzschutz durch Holzmodifizierung, Sachverständigenbüro für Holzschutz, 2007
- [4] Krause, A.: Neue Materialien – neue Chancen für Holzfenster?, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2007
- [5] Militz, H.: Neuartige Verfahren der Holzmodifizierung für den Fenster- und Fassadenbau, ift Rosenheim, 2003
- [6] Militz, H.: Holzmodifizierung – Alternative Schutz- und Behandlungsverfahren, 22. Holzschutztagung der DGFH, Göttingen, 2000
- [7] Militz, H.: Übersichtsbericht – Acetyliertes Holz, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2001
- [8] Rapp, A. O.; Peek, R.-D.: Melaminharzimprägniertes sowie mit Wetterschutzlasur oberflächenbehandeltes und unbehandeltes Vollholz während zweijähriger Freilandbewitterung, Holz als Roh- und Werkstoff 57, Seite 331 – 339, 1999
- [9] Richter, K.: Neue Materialien und Beschichtungen für den Oberflächenschutz, Schweizer Holzbau 7/2005
- [10] Teischinger, A.: Modifiziertes Holz, Institut für Holzforschung, BOKU Wien, 2003
- [11] Wepner, F.: Produktinnovationen durch Holzmodifizierung, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2005

### **Weiterführende Literatur**

Forschungsvorhaben di-sta – Einheimisches, dimensionsstabilisiertes Holz für den Fenster und Fassadenbau, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V., DGfH-Az.: E-2001/03

Holzschutz mit Melaminharzen; Lukowsky, D., Dissertation, Universität Hamburg, 1999

## 8.2 Modifiziertes Holz Holzvernetzung

### 1 Allgemeines

Holzvernetzung ist die Modifizierung von Holz mittels reaktiver N-Methylol Harze. Hierfür können verschiedene N-Methylol Verbindungen verwendet werden, die ihren Ursprung in der Textilindustrie haben. Für die industrielle Vernetzung von Holz wird DMDHEU (Dimethyloldihydroxyethylenurea) eingesetzt, ein Kunstharz, das schon seit langem zur Hochveredelung von Baumwollfasern verwendet wird. Es handelt sich dabei um einen umweltverträglichen und sehr gut untersuchten Wirkstoff. Durch diese Behandlung wird Baumwolle bügelfrei, knitterfest und wasserabstoßend. Wie die Baumwolle, die nahezu ausschließlich aus Zellulose besteht, ist auch Holz zu über 50 % aus Zellulose aufgebaut.

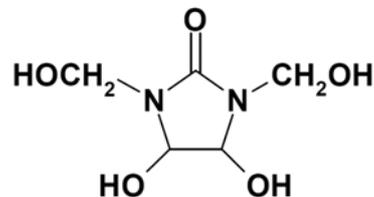


Abb. 1: Strukturformel DMDHEU [7]



Abb. 2: Vernetzung der Zellwände [16]

Dieses wasserlösliche Harz reagiert sehr gut mit Hydroxyl-Gruppen, welche in großer Anzahl in der Zellwand vorhanden sind. Das Harz ist in der Lage, in die Holzzellwand einzudringen. Bei geeigneten Prozessbedingungen lässt sich offenbar bewirken, dass sich die Moleküle untereinander oder auch mit der Zellwand vernetzen. Bei einer chemischen Reaktion mit der Zellwand werden durch den eingelagerten Stoff Zellulosefasern

miteinander verbunden. Aufgrund der vernetzenden Wirkung wird diese Art der Modifikation Holzvernetzung genannt. Diese Modifizierungsart ist gut geeignet für Kiefer und Buche. Vor allem die Modifizierung von Buche wurde und wird erforscht. Der Grund hierfür ist, dass Buche nicht besonders dauerhaft ist und mit der Holzvernetzung eine Möglichkeit gefunden wurde, Buche auch für den Außeneinsatz tauglich zu machen. Trotz erster Produkte aus modifiziertem Buchenholz auf dem Markt ist die Wissenschaft aber noch mit grundlegenden Fragen beschäftigt. In einem aktuellen Forschungsvorhaben (Verbundprojekt „Innovative modifizierte Buchenholzprodukte“) wird derzeit der Frage nachgegangen, ob das Kunstharz tatsächlich mit der Zellwand reagiert oder sich die Moleküle nur untereinander vernetzen und den Raum zwischen den Holzfasern ausfüllen. Und ob die Moleküle des Wirkstoffs tatsächlich mit Zellulose oder auch mit Hemizellulose und Lignin reagieren. Erst wenn die Wirkungsweise wirklich genau bekannt ist kann man abschätzen ob diese Form der Modifizierung auch für andere Holzarten in Betracht kommt und wie man den Prozess abändern müsste.

Die Wirkungsweise der Modifizierung von Holz mit DMDHEU besteht darin, dass das Holz während der Behandlung quillt und in diesem Zustand fixiert wird. So wird die Zellwand in einen Zustand dauerhafter Quellung versetzt, den so genannten Bulking-Effekt. Dieser Effekt trägt entscheidend zur Verbesserung der Dimensionsstabilität bei, da es keinen Raum mehr für eindringende Wassermoleküle in die Zellwand gibt. Auch holzabbauende Pilze werden erheblich behindert, wie langfristige Tests beweisen [8]. Durch die Holzvernetzung wird nicht nur die Oberfläche verbessert, sondern der gesamte Querschnitt vollständig modifiziert. Ein verwandtes Verfahren der Holzvernetzung ist die Behandlung von Holz mit Melaminharz. Auch bei diesem Verfahren werden Harze aus N-Methylol Verbindungen eingesetzt.

Der Einsatz von Kunstharzen und natürlichen Harzen zur Holzmodifizierung wird schon seit vielen Jahrzehnten untersucht. Unter dem Gesichtspunkt ein Modifizierungsverfahren mit hoher Kosten-Nutzen-Effizienz zu entwickeln, wurden bereits 1987 die ersten Versuche mit Dimethylol-Verbindungen durchgeführt [4]. Das Verfahren wurde dann in Kooperation des Institut für Holzbiologie und Holztechnologie der Universität Göttingen, der Fritz Becker KG in Brakel und der Firma BASF bis zur Serienreife entwickelt und vor allem auf die Modifizierung von Formteilen aus Buche abgestimmt. Der Grund waren langjährige Überlegungen Buche für den Außeneinsatz haltbar zu machen, da Lackierungen und ähnliche Behandlungen keine dauerhaften Verbesserungen brachten. Erste Versuche mit behandelten Furnieren und Formteilen in der Außenbewitterung und der Klimakammer wurden 2003 an der Universität Göttingen unter der Leitung von Prof. Dr. Holger Militz durchgeführt. Nach viel versprechenden Ergebnissen wurde gemeinsam ein Verfahren zur Behandlung von Buchenfurnieren in wetterfester Ausführung entwickelt. In weiteren Versuchen mit einer Pilotanlage wurde das Verfahren weiterentwickelt und bis zur Serienreife gebracht. Das Verfahren wurde patentiert und der Wirkstoff wird unter dem Namen Belmadur angeboten. Erste Produkte sind seit 2006 auf dem Markt.

## 2 Einsatzgebiete

Besonders interessant ist dieses Verfahren für die nicht dauerhafte Buche, die nach der Behandlung von Dauerhaftigkeitsklasse 5 in Dauerhaftigkeitsklasse 1 bis 2 rückt und somit auch im Außenbereich verwendet werden kann. Daher wird diese Methode bereits in Bereichen mit stark wechselnder Feuchte, beispielsweise bei der Herstellung von Sitzmöbeln aus Buchenformholz für den Außenbereich oder für Türen, angewendet. Als Produkte sind bisher nur Formholzstühle für den Außenbereich erhältlich. Fenster und Haustüren aus

vernetzter Buche sind derzeit als Prototypen in der Erprobung.



Abb. 3: Gartenmöbel im Außenbereich [14]

Dieses Modifikationsverfahren ist gerade bei formverpressten Furniersperrhölzern (Formsperrholz) interessant, da die Behandlung mit dem Holzvernetzer zwischen der Furnierherstellung und dem Trocknungsverfahren erfolgen kann. Das heißt, das entstehende Sperrholz wird während seiner Herstellung modifiziert und ist somit einfach in den Materialfluss einzuordnen. Hierbei zielt die Industrie auf eine kombinierte Produktverbesserung bezüglich der Dauerhaftigkeit mit gleichzeitiger Verbesserung der Dimensionsstabilität, wodurch man sich erhöhte Standzeiten von Produkten unter Außenbewitterungsbeanspruchung verspricht. Ergänzend kommt hinzu, dass das für dieses Verfahren besonders geeignete Buchenholz in der Formholzindustrie wegen seiner hervorragenden Verformbarkeit sowie der Furnierschälbarkeit eine entscheidende Rolle spielt und dadurch auch im Außenbereich eingesetzt werden kann, wodurch sich neue Einsatzgebiete ergeben. Denkbar wären z.B. Fassaden, Terrassenbeläge oder auch der Einsatz in Feucht- und Nassräumen. Zusätzliche Anwendungsbereiche könnten dadurch geschaffen werden, dass sich während des Prozesses auch gleichzeitig über Farbpigmente in der Behandlungslösung Farbefekte in das Holz einbringen lassen und so auch

dunkle Farbtöne als Tropenholzersatz möglich sind.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse und die noch unzureichenden Kenntnisse über wirtschaftliche Aspekte des Verfahrens reichen nicht aus, um das Potential dieser Behandlung für Fassadenhölzer abzuschätzen.

Durch seine gesteigerte Härte wäre vernetztes Holz gut für Parkett geeignet und könnte eine bessere Härte wie Laminat erzielen. Dafür spricht auch die verbesserte Dimensionsstabilität.

Der Einsatz modifizierter Buche im konstruktiven Bereich ist zum jetzigen Zeitpunkt eher unwahrscheinlich, da das Holz durch die Behandlung spröder wird. Zudem ist die vollständige Modifizierung in Abmessungen von Konstruktionshölzern noch nicht möglich. In Versuchen konnten in semi-industriellen Tränkungsanlagen aber bereits Hölzer mit einem Querschnitt von 8 cm x 8 cm über den ganzen Querschnitt getränkt werden [8].

### 3 Einflussfaktoren

Der Erfolg des Prozesses ist in großem Maße von der Holzart abhängig. Anatomie und Chemie des verwendeten Holzes spielen eine große Rolle. Buchen- und Kiefernholz lassen sich sehr gut behandeln, da sie sich gut imprägnieren lassen. Fichte ist für diese Art der Modifikation eher ungeeignet, da sie sich kaum tränken lässt.

Weitere Parameter sind Abmessungen der Hölzer, die Konzentration der verwendeten DMDHEU-Lösung, Art und Konzentration des verwendeten Katalysators Magnesiumchlorid, Stärke und Zeitintervall von Vakuum und Druck sowie das Aushärtungsverfahren.

Werden Druck und Vakuum nicht exakt gesteuert kann es sein, dass die Lösung nicht über den ganzen Querschnitt verteilt ist. Grundlage für die

Behandlung ist jedoch, dass die Substanz tief genug ins Holz eindringt. Das Aushärtungsverfahren muss heiß genug sein, damit es zu einer Reaktion der Moleküle kommt, ohne dass das Holz spröde wird.

## 4 Veränderung der materialtechnischen Eigenschaften

### 4.1 Dimensionsstabilität

Die Verbesserung der Dimensionsstabilität beruht im Ganzen auf den Veränderungen in der Zellwand. Durch den Bulking-Effekt liegt die Zellwand schon in einem Zustand ständiger Quellung vor. Sie sind in einem dauerhaft gequollenen Zustand fixiert. Die Vernetzung sorgt für die dauerhafte Blockierung der Hydroxylgruppen in der Zellwand. Eindringende Wassermoleküle können sich nicht mehr an der Zellwand anlagern. Die Quervernetzung führt gleichzeitig dazu, dass das Holz nicht mehr bis zur ursprünglichen Größe quellen kann. Diese zwei Tatsachen, dass beim Quellen und Schwinden des Holzes die Volumenänderung sowohl nach unten als auch nach oben eingeschränkt ist, führt, in Abhängigkeit von der Vernetzungsintensität, zu einer Verbesserung der Dimensionsstabilität. Die Volumenänderung durch Quellen und Schwinden beträgt bei unbehandelter Buche ca. 20 % und verbessert sich durch die Behandlung auf unter 10 % [7].

Da nur die Zellwände imprägniert werden, kann das Holz weiterhin atmen und Wasser aufnehmen und wieder abgeben, ohne aber dabei stark zu quellen und zu schwinden.

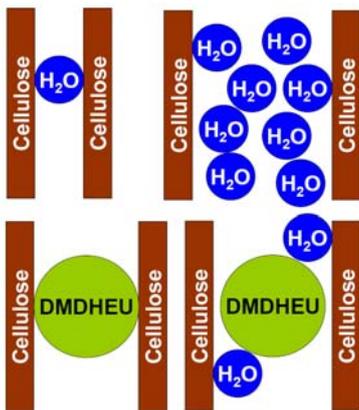


Abb. 4: Wirkprinzip von DMDHEU [7]

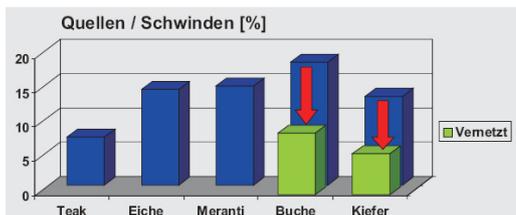


Abb. 5: Verbesserung des Schwind- / Quellverhaltens [15]

#### 4.2 Dauerhaftigkeit

In Laboruntersuchungen und in Freilandtests zeigte sich die verbesserte Dauerhaftigkeit des vernetzten Holzes. Die Dauerhaftigkeit des Holzes wird durch die Vernetzungsintensität bestimmt. Geringe Vernetzungsintensität führt zu einer leichten Steigerung der Resistenz gegen Holz zerstörende Pilze, bei hoher Vernetzungsintensität ist das Holz fast nicht mehr abbaubar. Durch die Vernetzung der Zellulose in den Zellwänden können Holz zerstörende Pilze die Zellulosestrukturen nicht mehr abbauen. Durch die Behandlung rückt Buche von der schlechtesten Dauerhaftigkeitsklasse (Klasse 5) in Klasse 1 bis 2. Somit ist es für den Einsatz im Freien tauglich. Bläuepilzbefall kann durch die Holzvernetzung nicht verhindert werden.

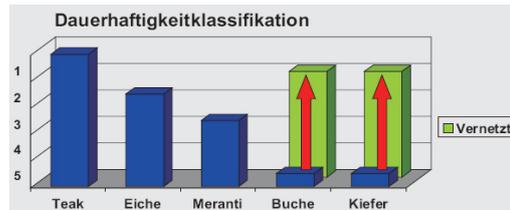


Abb. 6: Einstufung in Dauerhaftigkeitsklassen [15]

Tests mit Buchenholz im Erdkontakt laufen schon seit mehr als 4 Jahren ohne dass sich das Holz zersetzt hat.

Über die Dauerhaftigkeit in Salzwasser liegen noch keine gesicherten Erkenntnisse vor. Erste Testes werden gerade durchgeführt.

#### 4.3 Verwitterungseigenschaften

Die Widerstandsfähigkeit des Holzes gegenüber natürlicher Bewitterung wird stark verbessert. Das Verwitterungsverhalten verlangsamt sich. Die Vergrauung und Oberflächenerosion wird reduziert, aber nicht vollständig unterbunden.



Abb. 5: Zweijähriger Bewitterungstest [7]

#### 4.4 Oberflächenbehandlung

Die Behandlung der Oberflächen mit Lasuren oder deckenden Anstrichen ist problemlos möglich. Durch die verbesserte Dimensionsstabilität halten sich Lacke und Lasuren besser auf der Oberfläche. Dadurch kann die Haltbarkeit von Anstrichen verlängert werden.

#### 4.5 Festigkeitseigenschaften

Die Oberflächenhärte des Holzes wird durch das Vernetzen sehr stark erhöht. Die Brinellhärte von vernetztem Holz kann das doppelte bis dreifache der Härte von unbehandeltem Holz erreichen. Vernetzte Buche wird durch die Behandlung doppelt so hart wie Eiche.

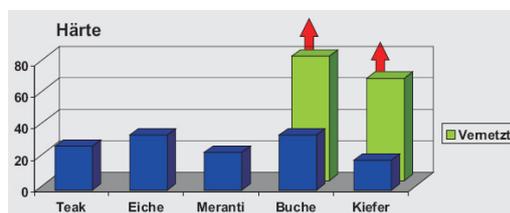


Abb. 7: Brinellhärte senkrecht zur Faser in N/mm<sup>2</sup> [15]

Kehrseite der erhöhten Härte ist die geringere Elastizität des Holzes, da durch die Vernetzung der Fasern die Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Faser eingeschränkt werden, wodurch das Holz spröder wird.

#### 4.6 Klebbarkeit

Die Verleimung mit wasserfestem Leim nach EN 204 (D3) ist problemlos möglich. Bei der Herstellung von Buchenschichtholzformteilen wird ein spezielles wasserfestes Zwei-Komponenten-Leimsystem eingesetzt, so dass auch die Leimfuge wetterfest ist.

#### 4.7 Änderung Masse

Durch die Behandlung kommt es zu einer Erhöhung des Gewichts um ca. 10 %.

#### 4.8 Farbänderung

Die Vernetzung verursacht keine Verfärbung oder andere Beeinträchtigung der Optik. Eine Besonderheit dieses Verfahrens ist die Möglichkeit der Durchfärbung von Holz. Der wässrigen Vernetzerlösung können dispergierbare Pigmente zugeführt werden. Da der ganze Querschnitt modifiziert wird erfolgt auch die Verfärbung über das gesamte Volumen. Es ist jeder Farbton möglich. Er addiert sich zur natürlichen Farbe des Holzes. Daraus ergeben sich neue Designmöglichkeiten für Holz.

#### 4.9 Haptik

Die Oberfläche wird härter und damit glatter.

#### 4.10 Bearbeitbarkeit

Das Holz wird härter und dadurch zugleich spröder. Erste Erfahrungen bei der Bearbeitung von Buchenholzformteilen zeigen dass es beim Fräsen wegen der erhöhten Härte fast keine Ausrisse gibt, die Kantenbearbeitung aber aufwändiger ist.

Da vernetzte Furniere spröder sind, lassen sich dreidimensionale Verformungen von Buchenholzformteilen nicht ganz so weit ausreizen wie mit unbehandelten Furnieren.

#### 5 Prozess

Der Prozess besteht aus den zwei Prozessschritten Imprägnierung und Vernetzung. Die Vernetzung von Holz lässt sich grundsätzlich mit allen Holzarten durchführen, die sich gut tränken lassen. Besonders gute Ergebnisse werden mit Buche und Kiefer erreicht.

Zuerst wird die Vernetzerchemikalie, die als wässrige Lösung vorliegt, durch den Wechsel von Vakuum und Hochdruck, das sogenannte Vakuum-Druck-Verfahren ins Holz eingebracht. Dabei wird über das Vakuum die Luft aus der Zellstruktur des Holzes entfernt und anschließend die Imprägnier-

anlage mit der Lösung geflutet. Unter hohem Druck wird der Wirkstoff in das Holz eingepresst und dadurch der ganze Querschnitt durchtränkt.



Abb. 8: Tränkungsanlage [BASF]

Als zweiter Schritt folgt die Vernetzung der Moleküle. Im Heißdampftrockner erfolgt durch Hitze und den Katalysator Magnesiumchlorid die Vernetzung der Moleküle. Dabei findet die chemische Reaktion zwischen eingebrachter Lösung und Zellwand oder den Molekülen der Lösung untereinander statt. Um diese in Gang zu bringen wird eine Reaktionstemperatur von über 100 °C benötigt. Ein DMDHEU-Molekül besitzt jeweils zwei Methylol- und zwei Hydroxyl-Gruppen. Durch die Behandlung erreicht man eine chemische Reaktion, bei der zwei oder mehr OH-Gruppen der Zellulosefasern mit einem DMDHEU-Molekül reagieren. Durch diese Vernetzung werden Fasern miteinander verbunden und führen zu einem dreidimensionalen Netzwerk.

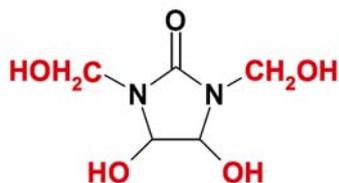


Abb. 9: Reaktive Teile (rot) des DMDHEU-Moleküls [7]

Es ist eine exakte Steuerung des Prozesses notwendig. Der Gehalt der Substanz darf nicht zu hoch und nicht zu niedrig sein. Zur Vernetzung

muss es heiß genug für die Reaktion sein, ohne dass das Holz reißt oder spröde wird. Gerade bei der Behandlung von Schäl furnieren muss die Trocknung so gesteuert werden, dass die Schichten nicht zu spröde werden und die Vernetzung erst beim Formen der Teile in der Presse einsetzt. Ansonsten bricht das Holz wie Glas.

Für das Einbringen der Lösung werden Tränkungsanlagen verwendet, wie sie in der Holzindustrie bereits für das Tränken von Holz verwendet werden. Zusätzlich wird ein leistungsfähiger Trockner, ein Heißdampftrockner, benötigt.

Bei der Formholzherstellung kann die Behandlung in den Prozessablauf integriert werden. Der Prozess verlängert sich dadurch um einen weiteren Schritt, das Tränken der dünnen Schäl furniere aus Buche.

## 6 Ökonomie

Durch eine hohe Verfügbarkeit der relativ kostengünstigen und umweltverträglichen Vernetzungchemikalien bietet sich die kommerzielle Umsetzung an. In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierten Projekt, das im Frühjahr 2005 gestartet ist, wird derzeit in Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Holz verarbeitenden Betrieben, der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, der BFH Hamburg und dem Institut für Holzbiologie und Holztechnologie der Universität Göttingen die Eignung dieses Verfahrens für die Behandlung von Rotbuche untersucht. Das Ziel besteht in einer Verbesserung der Holzeigenschaften, um neue Anwendungsfelder zu erschließen und so den Absatz von Buche zu steigern.

## 7 Gesundheit

Die Technologie beruht auf einem umweltverträglichen und sehr gut untersuchten Wirkstoff, der nach OECD-Studien unbedenklich ist. Eine analoge Technologie wird bei Textilien bereits seit

längerem eingesetzt und entspricht dort dem toxikologischen und ökologischen Standard Ökotex 100.

Die Modifizierung trägt zu einer Formaldehyd-emission aus dem Holz bei, die jedoch den E1-Grenzwert, der für Holzwerkstoffe gültig ist, unterschreitet. Emissionen können durch geeignete Formulierungs- und Prozesstechnologien reduziert werden. Die gesamten Emissionen, so genannte VOC, sind geringer als bei natürlichem Holz, da diese Stoffe zum Teil während des Modifizierungsprozesses entfernt werden.

#### 8 Patent

Das Verfahren ist durch die BASF weltweit geschützt und wird unter dem Namen Belmadur vertrieben. Die BASF wird die Belmadur Technologie über ausgewählte Holzverarbeiter und Hersteller von Holzprodukten, so genannte Systempartner, zunächst in den europäischen Ländern vermarkten. Voraussetzung ist der Abschluss einer Lizenzvereinbarung. Dabei wird der Prozess, wie auch die Belmadur Lösung auf die jeweiligen Anforderungen des Systempartners abgestimmt. Bisheriger Systempartner ist die Becker KG, die auch an der Entwicklung des Prozesses beteiligt war.

#### Quellen

- [1] Militz, H.: Neuartige Verfahren der Holzmodifizierung für den Fenster- und Fassadenbau, ift Rosenheim, 2003
- [2] Krause, A.: Neue Materialien – neue Chancen für Holzfenster?, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2007
- [3] Mai, C.; Militz, H.: Im (Holz-) Kern verändert, Georgia Augusta 4/2005, Universität Göttingen, 2005
- [4] Wepner, F.: Produktinnovationen durch Holzmodifizierung, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2005
- [5] Militz, H.: Holzmodifizierung – Alternative Schutz- und Behandlungsverfahren, 22. Holzschutztagung der DGFH, Göttingen, 2000
- [6] Militz, H.: Übersichtsbericht – Acetyliertes Holz, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2001
- [7] Krause, A.: Holzvernetzung schafft wertvolles Holz, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen
- [8] Möhring, C.: Laborgespräch VI: Überraschung für Kenner, Modifiziertes Buchenholz – Von der Chemie der Zelle bis zum fertigen Produkt, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, 2008
- [9] Hoffrogge, C.: Hart und Wetter beständig wie Alu? – Modifiziertes Holz mit neuen Materialeigenschaften, Manuskript zur Sendung Leonardo – Wissenschaft und mehr, WDR5, Sendedatum: 04. November 2005
- [10] Mair, P.: Modifiziertes Holz – Der Markt der Zukunft?, DEGA Heft 27/2006
- [11] Dreimann, A.: Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit von Möbeln aus Sperrholz für den Außenbereich, Bachelor Thesis Kurzfassung, Fachhochschule Hildesheim, 2007
- [12] Richter, K.: Neue Materialien und Beschichtungen für den Oberflächenschutz, Schweizer Holzbau 7/2005
- [13] Götz M.; Illner M.; et al.: Einheimisches, dimensionsstabilisiertes Holz im Fenster- und Fassadenbau, Kurzbbericht, isp Rosenheim
- [14] Militz, H.: Vortrag „Wetterfestes Buchenformholz“ im Rahmen des Transferpreis OWL 2006
- [15] Bauen mit „neuem Holz“ TOLwood, Informationsschrift der Variotec Schweiz AG
- [16] Holzschutz durch Holzmodifizierung, Sachverständigenbüro für Holzschutz, 2007

### **Linkliste**

<http://www.belmadur.de>

Seite der BASF über die Belmadur Technologie

<http://www.buchenholzmodifizierung.de>

Internetseite zum Verbundprojekt „Innovative modifizierte Buchenholzprodukte“

<http://www.becker-kg.de>

Hersteller von Buchenholzformteilen. Systempartner der BASF

## 8.2 Modifiziertes Holz Siliziumhaltige Verbindungen

### 1 Allgemeines

Die Idee zur Behandlung von Holz mit Siliziumverbindungen kommt aus der Natur. Dies belegen Funde von versteinertem Holz auf der ganzen Welt.



Abb. 1: Versteinertes „mineralisiertes“ Holz im Petrified Forest National Park, Arizona, USA [2]

Es gibt unterschiedliche Arten von versteinertem Holz, die sich darin unterscheiden, durch welchen Stoff die Holzsubstanz ersetzt wurde. Das Vorbild der Modifizierung von Holz mit Siliziumverbindungen ist verkieseltes Holz. So werden Hölzer bezeichnet, bei denen die Holzsubstanz durch Kieselsäure ersetzt wurde. Deshalb spricht man in der Praxis auch oft von „Verkieselung“ und meint damit die Einlagerung von Siliziumverbindungen in das Holz, im Gegensatz zum Vorbild in der Natur, bei der die Holzsubstanz durch Siliziumverbindungen ersetzt wurde.

Zur Entstehung durfte das Holz nicht verrotten. Deshalb war eine Unterbrechung der Sauerstoffzufuhr sowie der Schutz vor Mikroorganismen notwendig. Dies wurde durch Ablagerung im Wasser oder Einbettung in vulkanische Aschen erreicht. Organische Stoffe des Holzes wurden durch Kieselsäure ersetzt. Kieselsäure kommt häufig in vulkanischen Ablagerungen vor, kann aber auch in Sedimenten von Flüssen und Seen entstehen. Die Kieselsäure dringt in das Holz ein und kristallisiert. Die Geschwindigkeit der Kristal-

lisation ist abhängig von Druck- und Temperaturbedingungen. Dieser von der Natur erschaffene Modifizierungsprozess wird heute in verschiedenen Forschungsvorhaben (siehe Anhang) untersucht. Ziel ist die industrielle Umsetzung. Bisher sind die Bemühungen jedoch auf den Einsatz im Labor beschränkt. Allerdings soll bei aktuellen Verfahren, im Gegensatz zum natürlichen Vorbild, die Holzsubstanz nicht ersetzt, sondern Siliziumverbindungen in die Holzsubstanz eingelagert werden.

Während des zweiten Weltkrieges wurden Zusammensetzungen aus Kieselsäure und Natriumoxid / Kaliumoxid, umgangssprachlich auch bekannt als Wasserglas bzw. Kaliwasserglas, für oberflächige Verkieselungen von Holzbauteilen als Brandschutz eingesetzt. Auf älteren Dachstühlen ist dies noch als milchig weißer Überzug erkennbar. Gegen Ende des Krieges sollte dies als Schutz gegen Brandminen und Brandbomben der beginnenden Luftangriffe dienen. Solch behandelte Hölzer von damals sind bis heute von Insektenbefall unversehrt geblieben. Daher wurde diese Anwendung im Holzschutz erprobt. Der Verkieselungsprozess dauert dabei aber über Jahre und ist so lange wasserlöslich. Dies schloss eine Verwendung im Freien aus. Nur ein Verbau unter Dach war möglich.

Bei der Behandlung von Holz mit siliziumhaltigen Verbindungen entsteht ein Verbundwerkstoff bei dem beständige, mineralische Bestandteile und vergängliche, kohlenstoffhaltige Bestandteile zusammengeführt werden. Man erhält mineralisiertes Holz, ein anorganisch-organischer Verbundwerkstoff. Aufgrund seiner komplexen inneren Poren- und Kanalgeometrie und der chemischen Zusammensetzung bietet sich das Holz für eine Infiltration mit siliziumhaltigen Tränklösungen an, da diese eine sehr kleine Feststoffgröße haben. Das vierwertige Siliziumatom kann Bindungen mit freien Hydroxyl-Gruppen der Zellulose bilden und

dadurch funktionelle Gruppen im Holz binden. Zusätzlich zur Änderung der Zellwandstruktur kommt es auch zu einer Einlagerung im Zelllumen. Es kann eine Vielzahl möglicher Siliziumverbindungen als Ausgangsstoff für die Modifizierung verwendet werden. Dabei werden Verbindungen von teilweise höchst unterschiedlicher Natur, die verschiedenen Stoffgruppen angehören, verwendet. Dies führt dazu, dass die Veränderung der Eigenschaften entscheidend von der verwendeten Verbindung abhängt. Dadurch besteht aber auch die Möglichkeit, die Veränderung der gewünschten Eigenschaften über die Zusammensetzung Tränklösung mit verschiedenen Siliziumverbindungen zu steuern.

Siliziumverbindungen werden auch für die Oberflächenbehandlung eingesetzt und eignen sich aufgrund ihrer Größe und Zusammensetzung vor allem für Nanobeschichtungen.

## 2 Einsatzgebiete

Aufgrund der verbesserten Dimensionsstabilität und verbesserten Dauerhaftigkeit zeichnet sich eine vielfältige Verwendung ab. Besonders interessant macht diese Methode aber die Erhöhung des Feuerwiderstandes, die durch Zugabe von Flammenschutzmitteln noch verbessert werden kann. Damit wäre eine Verwendung im konstruktiven Bereich, sollten es die Festigkeitswerte zulassen, möglich.

## 3 Veränderung der materialtechnischen Eigenschaften

Die Eindringtiefe der Chemikalien variiert je nach Holzart sehr stark. Kiefer- und Buchenholz sind sehr gut imprägnierbar. Bei Fichtenholz dringen die Chemikalien aufgrund anatomischer Besonderheiten nur einige Millimeter ein.

Durch die verschiedenen möglichen Siliziumverbindungen können die Holzeigenschaften unterschiedlich stark variieren.

Die Ergebnisse der veränderten materialtechnischen Eigenschaften beziehen sich auf Versuche mit Kieselsole behandelter Kiefer und Buche im Rahmen des Projektes der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

### 3.1 Sorptionsverhalten

Die Angaben zum Sorptionsverhalten widersprechen sich. Während sich in einem Fall eine verminderte Feuchtigkeitsaufnahme zeigte, bei der bei Feuchtlagerung in 100 % relativer Luftfeuchte und bei 23 °C die Ausgleichsfeuchte weniger als 10 % betrug, ergab sich im anderen Fall eine Erhöhung der Ausgleichsfeuchte um 1,5 % bis 4,5 % in Abhängigkeit vom gewählten Klima. Dies kann aber auch auf die Verwendung verschiedener Siliziumverbindungen zurückgeführt werden.

### 3.2 Dimensionsstabilität

Auch über die Dimensionsstabilität liegen unterschiedliche Angaben vor. Während es bei der Verwendung von Alkoxysilanen zu einer Verbesserung der Dimensionsstabilität von bis zu 42 % kam wurde bei der Tränkung mit reinem Siliziumdioxid-Sol eine verschlechterte Formstabilität im Differenzklima festgestellt.

### 3.3 Dauerhaftigkeit

Der Masseabbau durch holzerstörende Pilze wurde bei behandeltem Kiefernholz um mindestens 60 % gegenüber unbehandeltem verbessert. Der in der Norm EN 113 definierte Grenzwert für den Masseabbau von 3 % konnte allerdings ohne weitere Zusätze nicht erreicht werden. Durch Zugabe von Kupfer zum Sol wird der Grenzwert dagegen erreicht.

Eine Schädigung durch Larven des Hausbockkäfers konnte verhindert werden. Zudem wurde eine erhöhte Resistenz gegenüber Termiten festgestellt.

### 3.4 Verwitterungseigenschaften

Versuche mit künstlich bewitterten Proben zeigten sowohl einen Schutz vor schneller Verfärbung als auch zusätzlich eine Verzögerung der Rissbildung.

### 3.5 Festigkeitseigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften des Holzes bleiben erhalten. Der E-Modul wird durch die Behandlung fast nicht verändert. In Abhängigkeit der verwendeten Siliziumverbindung kann die Härte um bis zu 70 % gesteigert werden. Bei tiefer gehenden Tränkbehandlungen ist eine Versprödung und damit eine geringere Bruchschlagzähigkeit des Materials nicht auszuschließen.

### 3.6 Brandverhalten

Bei Verwendung von reinen Siliziumdioxid-Solen lässt sich eine Verbesserung des Feuerwiderstands feststellen. Die Behandlung reicht aber nicht aus um die Einstufung „schwerentflammbar“ (B1 nach DIN 4102) zu erreichen. Erst durch eine Behandlung mit einer Kombination von industriellem Flammschutzmittel und dem reinen Siliziumdioxid-Sol lässt sich diese Einstufung erreichen. Diese Kombinationsträngung erreicht aber momentan noch nicht die für einen Außen-einsatz notwendige Auswaschbeständigkeit.

### 3.7 Bearbeitbarkeit

In Abhängigkeit der Behandlung kann es durch die größere Härte des Materials zu einer verstärkten Abstumpfung von Geräten kommen.

### 3.8 Änderung Masse

Durch die Einlagerung in die Holzstruktur erhöht sich zwangsläufig die Dichte. Bei Kiefernholz betrug der Anstieg der Dichte bis zu 40 %.

### 3.9 Oberflächenbehandlung

Die Haftungseigenschaften für Beschichtungsmaterialien sind abhängig von der gewählten Siliziumverbindung. Während sich die Lackhaftung

bei manchen Verbindungen verschlechtern kann, wurde z.B. bei Verwendung von Metalloxid-Solen kein Unterschied in den Haftungseigenschaften festgestellt.

### 3.10 Klebbarkeit

Die Verleimung mit MUF-Harz und PVAc zur Bestimmung der Bindefestigkeit ergab, dass der nach DIN EN 204 geforderte Mindestwert für die Klebfestigkeit nach 7-tägiger Lagerung im Normklima von  $\geq 10 \text{ N/mm}^2$  von den mit PVAc verleimten Prüfkörpern erfüllt und von den mit MUF-Harz verleimten Proben nicht eingehalten wurde.

## 4 Vorgang der Modifizierung

Der Prozess besteht aus zwei Verfahrensschritten und ist für alle Arten von siliziumhaltigen Verbindungen einheitlich. Die Chemikalie ist in einem geeigneten Lösungsmittel gelöst oder dispergiert. Diese Tränklösung muss so in das Holz eingebracht werden, dass der gesamte Holzkörper durchtränkt ist. Um dies zu erreichen werden Vakuum-Druck-Verfahren angewendet, wie es auch bei konventionellen Imprägnierverfahren der Fall ist. Die Eindringtiefe der Chemikalien variiert bei diesem Verfahren je nach Holzart sehr stark und ist abhängig von der verwendeten Zusammensetzung der Tränklösung sowie der Imprägnierbarkeit der Holzart.

Im zweiten Schritt wird das imprägnierte Holz bei erhöhten Temperaturen getrocknet. Dabei bilden die siliziumhaltigen Verbindungen chemische Bindungen mit den freien Hydroxyl-Gruppen der Zellulose. Durch diesen Vorgang härten die Siliziumverbindungen im Holz aus und werden fixiert.

Ein Vorteil von Verkieselungsreaktionen zum Einsatz in der Holzmodifizierung ist erst dann gegeben, wenn die siliziumhaltigen Verbindungen chemische Verbindungen mit den Holzzellwandkomponenten eingehen. Erst dadurch wird das Holz nicht nur wasserabweisend, sondern besitzt

auch ein verbessertes Quell- und Schwindverhalten und eine erhöhte Dauerhaftigkeit.

Durch die Einlagerung von Substanzen in die Zellwand entsteht ein Zustand permanenter Quellung. Dieser Effekt wird Bulking-Effekt genannt und führt zu einer verbesserten Dimensionsstabilität.

### 5 Mögliche Siliziumverbindungen

Die Modifikation von Holz ist mit verschiedenen siliziumhaltigen Verbindungen möglich. Die Wichtigsten werden hier kurz genannt.

Zu den rein anorganischen Siliziumverbindungen zählen Silikate wie z.B. Wasserglas. Diese werden überwiegend in den Lumen der Zellen abgelagert, dringen aber kaum in die Zellwand ein. Die Silikate sind nach der Trocknung noch nicht im Holz fixiert und können durch Wasser leicht ausgewaschen werden. Erst durch Neutralisation, z.B. durch den Kohlendioxidanteil der Luft kommt es zu einer Fällung der Silikate und damit zu ihrer auswaschbeständigen Fixierung.

Zu den organischen Siliziumverbindungen gehören die verschiedenen Alkoxysilane. Diese Verbindungen spalten in Anwesenheit von Wasser und teilweise von Katalysatoren Alkoholmoleküle ab (Hydrolyse). Die sich bildenden Siloxane neigen, unter Abspaltung von Wassermolekülen, zur Kondensation und bilden bei vollständiger Kondensation dreidimensionale  $\text{SiO}_2$  – Netzwerke („Glas“). Der Prozess – bestehend aus Hydrolyse und Kondensation der Alkoxysilane – wird als „Sol-Gel-Prozess“ bezeichnet. Wird Holz mit einer alkoholischen Lösung von Alkoxysilanen imprägniert, zu der vor der Behandlung Wasser gegeben wurde, so kann der „Sol-Gel-Prozess“ innerhalb der Holzsubstanz ablaufen. Organofunktionelle Silane sind Alkoxysilane, bei denen anstatt einem Kohlenwasserstoffrest eine funktionelle Gruppe gebunden ist. Durch diese Gruppe

lassen sich die Eigenschaften der gebildeten Gele und damit auch des behandelten Holzes gezielt steuern um bestimmte Eigenschaften zu erzielen. So können z.B. zur Erhöhung des Feuerwiderstandes flammhemmende Gruppen angebunden werden.

Die Silikone sind eine weitere Gruppe von Siliziumverbindungen. Da Silikon nicht wasserlöslich ist werden diese überwiegend in Form so genannter Makro- oder Mikroemulsionen eingesetzt. Bei Makroemulsionen ist die Eindringtiefe innerhalb eines Holzkörpers relativ gering. Die Silikone werden überwiegend in den Zelllumen abgelagert. Mikroemulsionen können dagegen auch in die Zellwand eindringen und dort eine Einlagerung der Silikone bewirken. Für Vollimprägnierungen werden daher Mikroemulsionen verwendet während Makroemulsionen eher für Oberflächenanwendungen in Frage kommen.

### 6 Ökonomie

Aufgrund der Möglichkeit die Veränderung der Eigenschaften von Holz, wie z.B. die Erhöhung des Feuerwiderstands, über die Zusammensetzung der verwendeten Siliziumverbindung zu steuern stellt diese Art der Modifikation einen interessanten Ansatz dar. In Zukunft werden voraussichtlich Produkte auf Basis verschiedener Siliziumtechnologien am Markt erhältlich sein.

**Quellen**

- [1] Böcker, W.: Verbundwerkstoff – Mineralisiertes Holz, Kurzbericht, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 2003
- [2] Ein Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) in Berlin, im Verbund mit Projektpartnern aus Wirtschaft und Forschung, [www.infoholz.de](http://www.infoholz.de)
- [3] Holzschutz durch Holzmodifizierung, Sachverständigenbüro für Holzschutz, 2007
- [4] Krause, A.: Innovation durch Holzmodifizierung, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen
- [5] Krug, D.: Untersuchungen zur Verbesserung des Brandverhaltens und der Formstabilität von Vollholz durch Imprägnierung mit Metalloxid-Solen, Projektzusammenfassung
- [6] Mai, C.; Militz, H.: Im (Holz-) Kern verändert, Georgia Augusta 4/2005, Universität Göttingen, 2005
- [7] Mai, C.; Militz, H.: Modification of wood with silicon compounds, Vortrag beim COST E22 Meeting in Tuusula, Finnland
- [8] Militz, H.: Holzmodifizierung – Alternative Schutz- und Behandlungsverfahren, 22. Holzschutztagung der DGFH, Göttingen, 2000
- [9] Militz, H.: Übersichtsbericht – Acetyliertes Holz, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2001
- [10] Militz, H.: Neuartige Verfahren der Holzmodifizierung für den Fenster- und Fassadenbau, ift Rosenheim, 2003
- [11] Richter, R.: Neue Materialien und Beschichtungen für den Oberflächenschutz, Empa, Abteilung Holz, Dübendorf 2005
- [12] Weigenand, O.: Wood modification with different types of silicon compounds, Dissertation, Kurzzusammenfassung, Universität Göttingen, 2006
- [13] Wepner, F.: Produktinnovationen durch Holzmodifizierung, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2005
- [14] Wie entsteht eigentlich versteinertes Holz, [www.versteinertes-holz.de](http://www.versteinertes-holz.de)

**Weiterführende Literatur**

Forschungsvorhaben: Verbundwerkstoff – Mineralisiertes Holz, Entwicklung umweltverträglicher Holzverbundwerkstoffe mit verbesserter biologischer Beständigkeit, Feuchtebeständigkeit und verbesserten mechanischen Eigenschaften. Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Fachgruppe IV.2, [www.bam.de](http://www.bam.de)

Holzmodifizierung mit siliciumhaltigen Verbindungen; Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte

Untersuchungen zur Verbesserung des Brandverhaltens und der Formstabilität von Vollholz durch Imprägnierung mit Metalloxid-Solen  
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, AiF, Köln  
AiF-Nr. 12931 BR

Wood modification with different types of silicon compounds, Weigenand O., Dissertation, Universität Göttingen, 2006



## 8.2 Modifiziertes Holz

### Thermische Modifizierung

#### 1 Allgemeines

Bei der thermischen Modifizierung von Holz handelt es sich, neben der chemischen Holzmodifizierung, um eine eigene Modifizierungsart. Der korrekte Fachbegriff ist thermisch modifiziertes Holz. Der nach wie vor häufig verwendete Begriff Thermoholz steht zwar synonym für thermisch modifiziertes Holz, ist aber nicht weiter definiert. Thermowood ist die Marke für Verfahren und Produkte der Finnish Thermowood Association und wird von deren Mitgliedern geführt. Als Kurzbezeichnung hat sich TMT etabliert, abgeleitet vom englischen Thermally Modified Timber und analog zu CMT, der Abkürzung für chemisch modifiziertes Holz (Chemically Modified Timber).

Mit der europäischen technischen Spezifikation CEN/TS 15679 „Thermisch modifiziertes Holz – Definitionen und Eigenschaften“, die zum März 2008 eingeführt wurde liegt nun auch eine normative Basis für TMT vor. Darin ist thermisch modifiziertes Holz oder TMT definiert als Holz, das bei Temperaturen von üblicherweise über 160 °C bei reduzierter Sauerstoffkonzentration behandelt wurde und bei dem wesentliche Eigenschaften über den gesamten Holzquerschnitt dauerhaft verändert sind. Bei der Definition wurde Wert darauf gelegt, offen für verschiedene Verfahren der thermischen Modifizierung zu sein. Hierzu zählen derzeit vier in Europa industriell angewendete Prozesse, die sich vor allem durch die Art und Weise unterscheiden, wie eine Reduzierung des Sauerstoffgehaltes der Kammeratmosphäre während der Behandlung erreicht wird.

Die thermische Modifizierung ist eine Teilpyrolyse in sauerstoffarmer Atmosphäre. Dies führt zu einer Änderung der chemischen Zusammensetzung der Zellwand. Es kommt zu einem Abbau der Hemizellulose und der Zellulose, sowie zu einem Abbau und teilweisen Umbau des Lignins. Ziel ist vor allem die Auflösung von Hemizellulose in hohem Maße, was zu einer deutlichen Reduzierung

der Anzahl an OH-Gruppen (Hydroxyl-Gruppen) führt. Die Veränderung der Zellstruktur erfolgt über den gesamten Querschnitt.

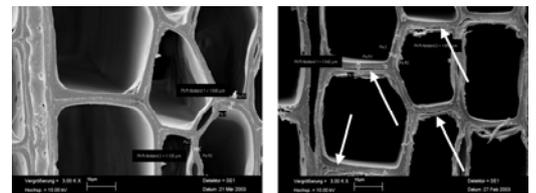


Abb. 1: Rissbildung in der Zellwand durch Hitzebehandlung unbehandelt (links) und nach thermischer Behandlung (rechts)

Hauptziele der thermischen Modifikation sind vor allem eine erhöhte Dimensionsstabilität, geringere Gleichgewichtsfeuchten und eine erhöhte Beständigkeit gegen holzerstörende Pilze. Durch die Behandlung erhält das Holz einen dunkleren Farbton, weshalb es auch gerne als Tropenholzersatz verwendet wird. Die Dauerhaftigkeitserhöhung des Holzes durch Hitzebehandlung ist jedoch mit Festigkeitseinbußen im statischen und besonders im dynamischen Bereich, im Vergleich zu unbehandeltem Holz, verbunden. Aufgrund der reduzierten Festigkeitswerte ist derzeit eine Verwendung für tragende und aussteifende Teile ohne geeigneten Verwendbarkeitsnachweis nicht zulässig.

In der Regel wird TMT als thermisch behandeltes Schnittholz (Halbfertigerzeugnis) in Form von Brettern oder Bohlen angeboten. Da sich die Sortimente aber nicht nur durch die Holzart, sondern auch durch Hersteller bzw. Verfahren und Behandlungsstufe unterscheiden weisen sie jeweils ein spezifisches Eigenschaftsprofil auf. Daher sollte TMT als eigene Holzartengruppe und TMT-Sortimente als eigene Holzart betrachtet werden.

Auch bei der thermischen Modifizierung von Holz handelt es sich nicht um eine völlig neue Methode. Bereits vor einigen hundert Jahren wussten die Menschen, dass man mit Feuer Holz dauer-

hafter machen konnte. Das Verfahren der Feuerbehandlung wurde für Außenanwendungen wie Umzäunungen genutzt. Der erste industrielle Prozess zur Hitzebehandlung von Holz wurde 1946 von Stamm entwickelt. Vorrangiges Ziel war es, die Dimensionsstabilität von Holzbauteilen zu verbessern. Das so genannte „Staybwood“ wurde in einer Metallschmelze hitzebehandelt. Die industrielle Umsetzung war jedoch stark begrenzt, da die Versprödung des Materials durch die Hitze einwirkung die Anwendungen stark einschränkte. In Deutschland entwickelte Burmester 1974 das Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren (FWD-Verfahren). Bei diesem Verfahren wurde Holz mit einem Feuchtegehalt von 20 bis 30 % in einem geschlossenen System unter Druck einer Hitzebehandlung ausgesetzt. Das Verfahren erreichte aber nicht die Praxisreife, da neben den reduzierten Festigkeitseigenschaften die im Vergleich zur Schutzmitteltränkung höheren Prozesskosten eine industrielle Umsetzung verhinderten. Erst nachdem Fragestellungen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von Holzschutzmitteln und der Tropenholznutzung marktrelevant wurden, wurde die Entwicklung von Hitzebehandlungsverfahren in den 1980er Jahren wieder aufgenommen. 1981 wurde von Giebler die Behandlung im Autoklaven unter Stickstoffatmosphäre untersucht. Dieses Verfahren wird seit 2003 von der Firma Balz Holz AG industriell umgesetzt. Seit 1995 gab es dann zahlreiche Arbeiten in Deutschland, den Niederlanden, Finnland und Österreich. Verfahren zur thermischen Modifizierung von Vollholz haben sich in den vergangenen Jahren bis zur Marktreife entwickelt. Entsprechende Produkte werden beispielsweise als Thermowood, Menz-Holz oder Plato-Holz angeboten.

Thermisch modifiziertes Holz ist das Modifikationsverfahren, das als erstes auf dem Markt erhältlich war. Daher ist es auch am weitesten entwickelt. Auch beim Absatz liegt TMT weit vor den anderen Modifizierungsarten. Die Gesamtproduk-

tionskapazität der Hitzebehandlungsanlagen in Europa beläuft sich auf über 100 000 m<sup>3</sup> thermisch modifizierten Holzes pro Jahr. Trotz ständig steigender Menge bewegt man sich aber im Vergleich zum Holzmarkt insgesamt auf einem niedrigen Niveau. Aufgrund der relativ kurzen Verfügbarkeit am Markt sind zwar erste Erfahrungen vorhanden, Langzeitergebnisse liegen aber noch keine vor.

## 2 Einsatzzweck / -gebiete

Als Einsatzgebiete bieten sich sowohl der Innen- als auch der Außenbereich an. Im Innenbereich wird thermisch modifiziertes Holz gerne wegen seiner Farbänderung mit seiner schönen dunklen Färbung als Tropenholzersatz verwendet. Durch die durchgängige Modifizierung ist es, im Gegensatz zu oberflächenbehandelten Hölzern, abschleifbar. Die erhöhte Dimensionsstabilität ist in Bereichen, wie bei Parkett und Fußbodenbelägen, ebenfalls positiv. Gerade in den vom Tourismus geprägten Alpenregionen wird thermisch modifiziertes Holz wegen seines Altholzcharakters für den hochwertigen Innenausbau speziell gewünscht. Durch seine Eigenschaften findet es vor allem Anwendung als Parkett, für Möbel, Saunen und Bekleidungen für Wand und Decke. Gegenstand zahlreicher Arbeiten ist die thermische Modifizierung von Holzwerkstoffen, die bisher aber noch nicht zu einer Umsetzung im industriellen Maßstab geführt haben. Ziel hierbei ist vor allem die Verbesserung der Dimensionsstabilität, da deren Einfluss auf die Eigenschaften des Werkstoffes ungleich höher als für Vollholz ist. Damit könnten Holzwerkstoffe in Bereichen mit häufigen Feuchtwechseln eingesetzt werden. Diese Verwendung ist bei normalen Holzwerkstoffen durch die starke Dickenquellung eingeschränkt.

Im Außenbereich kommt es vor allem wegen der verbesserten Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität zum Einsatz und wird für Fassadenbekleidungen, Gartenmöbel, Türen und Fenster, Gar-

tenzäune und ähnliches verwendet. Direkter, dauerhafter Kontakt mit dem Erdreich sollte ohne weitere Schutzmaßnahmen vermieden werden. Thermisch modifiziertes Holz ist nicht für tragende und statisch beanspruchte Bauteile geeignet. Um dies zu ermöglichen wird die Kombination von thermischer Vergütung und Verdichtung untersucht. Dieser Kombinationswerkstoff soll für tragende Anwendungen im Ingenieurholzbau eingesetzt werden können.

Nach einer Studie der ETH Zürich findet TMT überwiegend Verwendung im Garten- und Landschaftsbau (52 %) und als Fassadenbekleidung (29 %). Eher gering ist die Verwendung im Innenausbau (7 %), Industriebau (3 %), Möbelbau (3 %), Saunabau (2 %) oder als Fenster und Türen (1 %).

### 3 Einflussfaktoren

Die Ausprägung verschiedener veränderter Produkteigenschaften hitzebehandelten Holzes hängen von Reaktionstemperatur und Reaktionsdauer, Wärmeleitmedium und Druckbedingungen des Hitzebehandlungsprozesses, sowie der Holzart und der Ausgangsfeuchte des behandelten Holzes ab und lassen sich durch die Prozessführung bis zu einem gewissen Grad steuern. Einige positiv bewertete Eigenschaften hitzebehandelten Holzes werden jedoch zum Teil nur bei gleichzeitiger Verschlechterung anderer wichtiger Produktparameter erzielt.

Bei kurzzeitiger, hydrothermischer Behandlung kommt es nur zu einer Änderung der Farbe.

### 4 Veränderung der materialtechnischen Eigenschaften

Bei stark erhöhten Prozesstemperaturen kann eine deutliche Steigerung der Dauerhaftigkeit gegen Pilzbefall erzielt werden, während der damit verbundene erhöhte Abbau, vor allem von Hemizellulosen im Holz, zu einer erhöhten Sprödigkeit

des Materials und deutlich geringeren Festigkeiten führt. Weitere für die Verwendung relevante gegenläufige Eigenschaftsentwicklungen finden sich bei Härte und Dimensionsstabilität, die bei erhöhter Prozesstemperatur und -dauer ansteigen, aber mit steigenden Prozessparametern auch zu einer starken Abnahme der mechanischen Festigkeiten führen, was einen Einsatz im konstruktiven Bereich einschränkt.

#### 4.1 Dimensionsstabilität

Durch die verschiedenen Hitzebehandlungsprozesse wird eine Verringerung des Quell- und Schwindverhaltens von Holz erreicht. In Abhängigkeit von den Prozessparametern der verschiedenen Verfahren und der behandelten Holzart wird eine Verbesserung der Dimensionsstabilität von 10 bis 40 % erreicht.

Die Fasersättigung lässt sich durch thermische Behandlung um bis zu 50 % reduzieren.

Die Wärmebehandlung verringert die Gleichgewichtsfeuchte des Holzes. Je nach Behandlung reduziert sich die Ausgleichsfeuchte etwa um die Hälfte.

Die verminderte Wasseraufnahmefähigkeit wird darauf zurückgeführt, dass vor allem die Hemizellulosen mit ihrem hohen Anteil an hydrophilen Hydroxyl-Gruppen bei der Wärmebehandlung abgebaut werden.

#### 4.2 Dauerhaftigkeit

Die Verbesserung der Beständigkeit von thermisch modifiziertem Holz gegenüber Holz zerstörenden Pilzen beruht darauf, dass das Holz nach der Wärmebehandlung bedeutend weniger Hemizellulose enthält, die von den Pilzen abgebaut wird.

Die Dauerhaftigkeit von Holz nimmt bei einstufigen Hitzebehandlungsverfahren unter Wasser-

dampf mit steigender Reaktionstemperatur und Reaktionszeit zu.

Dies gilt auch für das Öl-Hitze-Verfahren. Wobei Kiefern-Splintholz bei diesem Verfahren gegenüber Braunfäule resistenter wird als Fichte. Die Dauerhaftigkeit kann über eine gesteuerte Erhöhung der Ölaufnahme weiter gesteigert werden. Eine verbesserte Pilzresistenz von hitzebehandelter Fichte ist gegenüber Weisfäule und verschiedenen Braunfäulepilzen gegeben.

Das mehrstufige Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren (FWD-Verfahren) bewirkt trotz niedrigerer Reaktionstemperaturen als bei einstufigen Verfahren im gleichen Wärmeleitmedium eine höhere Dauerhaftigkeit aller behandelten Holzarten. Fichte profitiert dabei sehr deutlich von der Hitzebehandlung.

Durch die Hitzebehandlung lässt sich zwar die Dauerhaftigkeit von Holzproben von einer nicht widerstandsfähigen zu einer mäßig widerstandsfähigen Klasse modifizieren, jedoch unterscheidet sich die erreichte Widerstandsklasse in Abhängigkeit von der Pilzart. Die erreichte Verbesserung der Pilzresistenz reicht nicht aus, um hitzebehandeltes Holz ohne weitere Schutzmaßnahmen im Erdkontakt einzusetzen.

Modifiziertem Holz aus einstufigen drucklosen Hitzebehandlungsverfahren in Wasserdampf-atmosphäre wird allgemein keine Dauerhaftigkeit bei Erdkontakt zugesprochen.

#### 4.3 Verwitterungseigenschaften

Die durch die Hitzebehandlung hervorgerufene dunklere Farbgebung ist nicht UV beständig, so dass thermisch modifiziertes Holz im gleichen Maße wie unbehandeltes Holz vergraut. Für thermisch modifizierte Hölzer gilt generell, dass sie, wie unbehandeltes Natur belassenes Holz auch, ohne weitere Schutzbehandlung nicht licht-

echt sind. Auch das oberflächliche Auftreten von Holz verfärbenden Pilzen ist möglich. Sollen diese Erscheinungen verhindert oder verzögert werden, muss ein geeigneter Oberflächenschutz aufgebracht werden.

#### 4.4 Festigkeitseigenschaften

Mit zunehmender Behandlungsintensität vermindern sich die Festigkeitseigenschaften. Die Abnahme der Biegefestigkeit kann bis zu 50 % betragen, während sich der E-Modul kaum ändert. Es kommt auch zu einer Abnahme der Brinellhärte. Diese steht in Korrelation mit der Massenabnahme, ist aber im Bereich der industriell angewendeten Prozesse mit einer Massenabnahme im Bereich von 6 bis 10 % nicht so stark. Besonders hoch ist die Abnahme der dynamischen Festigkeit mit bis zu 60 % Reduzierung der Bruchschlagarbeit, wodurch eine Verwendung für tragende und aussteifende Teile ohne geeigneten Verwendbarkeitsnachweis ausscheidet.

#### 4.5 Klebbarkeit

Bei Verleimungen mit Klebstoffen auf Wasserbasis wie z.B. Polyvinylacetat-Leime (PVAc) muss, aufgrund des veränderten Sorptionsverhaltens mit längeren Press- bzw. Aushärtungszeiten gearbeitet werden. Dabei gilt die Faustregel umso stärker das Holz behandelt wurde, desto länger sind die Trocknungszeiten. Dies kann mit der verminderten Wasseraufnahmefähigkeit hitzebehandelten Holzes erklärt werden. Aufgrund der erhöhten Sprödigkeit des Materials werden niedrigere Pressdrücke empfohlen.

Für Öl-Hitze behandelte Kiefer mit höherer Öl-Aufnahme führen nur modifizierte Leime zu guten Ergebnissen.

#### 4.6 Wärmedurchlasswiderstand

Holz, das in Wasserdampf- oder Intergas-Atmosphäre hitzebehandelt wurde, hat unter anderem aufgrund des Masseverlustes, einen höheren

Wärmedurchlasswiderstand als Natur belassenes Holz. Aus dieser positiven Produkteigenschaft und der erhöhten Pilzresistenz von hitzebehandeltem Holz ergibt sich ein viel versprechendes Einsatzpotential im Bereich Fensterrahmen und Türen oder im Einzelfall auch im Niedrigenergie- und Passiv-Hausbau ab.

#### **4.7 Änderung Masse / Volumen**

Die Hitzebehandlung von Holz führt durch Abbau von Holzbestandteilen zu einem Masseverlust, der in Abhängigkeit von der Holzart, dem Behandlungsverfahren und den Prozessparametern in der Regel zwischen 6 und 10 % betragen kann. Für das Öl-Hitze Verfahren lässt sich ein möglicher Holzsubstanzverlust als Folge der Öl-Hitzebehandlung nicht genau bestimmen, da durch die physikalische Aufnahme von Öl während dieses Verfahrens das modifizierte Material insgesamt eine Massezunahme zwischen 50 und 70 % erfährt.

#### **4.8 Farbänderung**

Für alle Hitzeverfahren und Holzarten wird eine Verdunklung der Farbgebung mit steigender Reaktionstemperatur erreicht. Für diese Farbänderung sind so genannte chromophore Verbindungen verantwortlich, welche bei der chemischen Reaktion der Hitzebehandlung gebildet werden. Die veränderte Farbe kann von leichter Bräunung heller Holzarten über Schokoladebraun bis zu schwarzbrauner Verfärbung des Holzes führen. Die Verfärbung findet über den ganzen Querschnitt des Holzes statt. Im Innenbereich verändert sich TMT durch Lichteinwirkung in seiner Farbe. Während unbehandelte, helle Hölzer nachdunkeln führt Tageslicht bei TMT zu einem Ausbleichen. Dies betrifft vor allem sehr dunkle, d.h. sehr stark behandelte Sortimente. Fußböden können mit einer lichtschutzmittelhaltigen Beschichtung versehen werden, die ein Ausbleichen deutlich vermindern kann.

#### **4.9 Bearbeitbarkeit**

Die Hitzebehandlung von Holz ist mit erhöhter Sprödigkeit verbunden. Diese Sprödigkeit führt einerseits dazu, dass das Material bei der Weiterbearbeitung stärker zum Ausreißen neigt als unbehandeltes Holz und andererseits der Holzstaub deutlich kleinere Partikel hat. Daher sind besonders scharfe Klingen der Bearbeitungsmaschinen erforderlich und zum Teil langsamere Vorschubgeschwindigkeiten beim Hobeln. Mit der Sprödigkeit geht auch ein verändertes Spaltverhalten einher. Mit verkürzten Standfestigkeiten der Bearbeitungsmaschinen ist nicht zu rechnen.

Es kann unter Umständen bei stoßartigen Belastungen zu Brüchen kommen, die bei unbehandeltem Holz so nicht zu erwarten sind.

#### **4.10 Rissbildung**

In geringem Umfang kann es zur Aufweitung vorhandener Risse kommen oder es können neue Risse insbesondere im Umfeld von Ästen auftreten. Holzarten höherer Dichte, vor allem Laubhölzer, neigen verstärkt zu Rissbildung. Risse haben ihre Ursache in inneren Spannungen, die bereits im Holz bestehen oder durch Vortrocknung oder Hitzebehandlung erzeugt werden. Diese Spannungen können bei Bewitterung durch Temperatur- und Feuchtewechsel erst später frei werden und in Gestalt von Rissen sichtbar werden. Verschiedene Praxisversuche mit bis zu 5-jähriger Bewitterung in der Fassadenanwendung haben aber gezeigt, dass TMT, aufgrund der erhöhten Dimensionsstabilität, eine geringe Neigung zur Rissbildung hat.

#### 4.11 Mechanische Verbindungen



Abb. 2: Schraubenausziehversuche vorgebohrt (links) und nicht vorgebohrt (rechts)

Durch die erhöhte Sprödigkeit des hitzebehandelten Holzes kann der Schraubenauszugswiderstand verringert sein.

Durch dieselbe veränderte Holzeigenschaft erhöht sich die Neigung zur Spaltung, und folglich eine Gefährdung beim Nageln. Daher empfehlen einige Hersteller, der Aufgabe entsprechend angemessen dimensionierte Nägel und Schrauben zu verwenden und Schraubverbindungen vorzubo-  
hren. Zudem sollten die Schrauben nicht zu tief ins Holz versenkt werden, da das Material sehr spröde ist.

Wenn keine rostfreien Nägel verwendet werden kommt es zu verstärkter Korrosion, da der pH-Wert gegenüber unbehandeltem Holz reduziert ist.

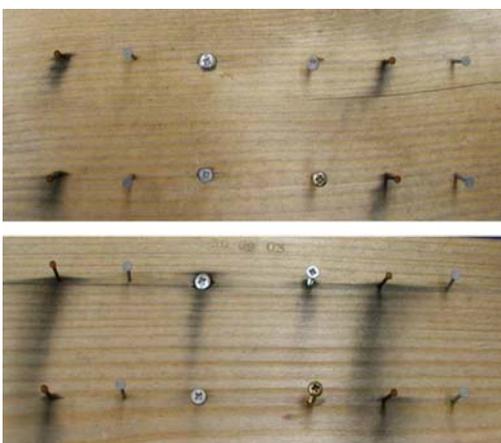


Abb. 3: Korrosion von Verbindungsmitteln bei unbehandeltem (oben) und behandeltem Holz (unten)

#### 4.12 Geruchsbildung

Teilweise kann es zu einem rauchigen Geruch des Holzes kommen. Dieser vergeht aber mit der Zeit oder kann durch eine Oberflächenbeschichtung verhindert werden.

#### 4.13 Oberflächenbeschichtungen

Um Vergrauung zu verhindern oder zu verzögern ist ein geeigneter Oberflächenschutz erforderlich. Für TMT gibt es verschiedene empfohlene Produkte im Handel. Anstrichsysteme, bestehend aus Grund-, Zwischen- und Endbeschichtung bieten den besten Schutz gegen Vergrauung. Bläue-, Schimmel- bzw. Algenbefall kann dadurch aber nicht verhindert werden.

#### 5 Vorgang der Modifizierung

Die Parameter der verschiedenen Hitzebehandlungsverfahren unterscheiden sich zum Teil erheblich voneinander. Gemeinsam ist den kommerziell eingesetzten Verfahren, dass sie unter sehr sauerstoffarmen Bedingungen in mehr oder weniger geschlossenen Systemen durchgeführt werden.

Das Wachstum im Bereich der Thermoholzproduktion ist sehr groß und es kommen viele neue Produzenten auf dem europäischen Markt hinzu. Dadurch existiert eine Vielzahl weiterer Techniken zur thermischen Modifikation. Diese sind aber zumeist an eines der vier etablierten und hier aufgeführten Verfahren angelehnt.

Die derzeit führenden Verfahren können grob in vier Gruppen eingeteilt werden.

- einstufige Wasserdampf-Verfahren
- Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren (FWD-Verfahren)
- Öl-Hitze-Verfahren
- Inertgas-Verfahren

## 6 Kurzbeschreibung der vier Verfahren

### 6.1 Einstufige Wasserdampf-Verfahren

Dieses einstufige Verfahren zur thermischen Modifikation von Vollholz wurde in den 1990er Jahren am Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), dem Technischen Forschungszentrum von Finnland entwickelt und ist deshalb auch unter dem Namen VTT-Verfahren bekannt. Dieses Verfahren wird von der Finnish Thermowood Association (FTWA) und ihrer Mitgliedsunternehmen angewandt und unter der Marke Thermowood vertrieben. Daher wird dieses Verfahren manchmal auch als Thermowood-Verfahren bezeichnet. Die FTWA wurde im Jahr 2000 gegründet und ist ein Zusammenschluss von zwölf Thermowood-Produzenten und drei Hitzebehandlungs-Anlagenbauern. Der Prozess erfolgt in einer Hochtemperaturkammer in Wasserdampf-Atmosphäre und lässt sich in drei Hauptphasen unterteilen. Durch Einblasen von Wasserdampf als Schutzgas wird die Umgebungstemperatur so weit vertrieben, dass der Sauerstoffgehalt weniger als 3,5 % beträgt und somit eine oxidative Zersetzung des Holzes vermieden werden kann. In der Aufheizphase erfolgt die Erhöhung der Temperatur und das Trocknen bei hoher Temperatur. Mittels Wärme und Dampf steigt die Temperatur in der Kammer schnell auf 100°C. Danach wird die Temperatur langsam weiter auf 130°C erhöht. Dabei wird fast bis zu einer Holzfeuchte von 0% getrocknet. Während der zweiten Phase erfolgt die eigentliche Temperaturbehandlung. Nach dem Hochtemperaturtrocknen wird die Temperatur innerhalb der Kammer, mit heißem Wasserdampf auf 185 bis 215°C erhöht und mit dem Erreichen des notwendigen Niveaus auf dieser Temperatur über die Dauer von 2 bis 3 Stunden unverändert gehalten. Abschließend erfolgt die Abkühlung und Regulierung der Ausgleichsfeuchte. In dieser letzten Phase wird die Temperatur mit Hilfe von Wasserzugabe gesenkt. Wenn eine Temperatur von 80 bis 90°C erreicht ist, wird das Holz wieder befeuchtet um den Feuchtigkeitsge-

halt auf ein Niveau von 4 bis 7% zu erhöhen. Der anfängliche Feuchtigkeitsgehalt hat keine besonderen Einfluss auf das Resultat der Wärmebehandlung. Es kann sowohl saftfrisches als auch getrocknetes Holz verwendet werden. Ebenso ist die Behandlung von Laub- und von Nadelhölzern möglich. Nachteilig bei diesem Verfahren ist die Aufweitung bereits vorhandener Risse und die Neubildung von Rissen, insbesondere im Umfeld von Ästen.

### 6.2 Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren (FWD-Verfahren)

Das FWD-Verfahren wird auch als Plato-Verfahren bezeichnet. Der Name Plato entstand aus der Ableitung von „Providing Lasting Advanced Timber Option“. Das Verfahren wurde in den 1980er Jahren von Mitarbeitern der Royal Dutch Shell in den Niederlanden entwickelt und baut auf den Grundlagen von Burmester auf. Das unter hohem Druck arbeitende Verfahren basiert auf vier Prozessstufen. In der ersten Phase, Hydrothermolysen genannt, wird das Holz für 4 bis 5 Stunden bei 165 °C bis 185 °C unter sehr feuchten Bedingungen (Sattdampf oder in Wasser) behandelt. Dies geschieht unter hohem Druck in einem geschlossenen Kessel. In der anschließenden Trocknungsphase wird das Holz in einer konventionellen Trockenkammer über 3 bis 5 Tage auf die Zielholzfeuchte von 8 % heruntergetrocknet. Es folgt die Aushärtungsphase, in der das Holz erneut für 14 bis 16 Stunden auf 150 °C bis 190 °C aufgeheizt wird. Abschließend folgt die Klimatisierungs- bzw. Veredelungsstufe für 2 bis 3 Tage.

Als Ausgangsmaterial können sowohl saftfrische als auch kammergetrocknete Laub- und Nadelhölzer verwendet werden. Bereits getrocknetes Holz wird am Anfang der ersten Phase angefeuchtet. Das Holz ist nach der Hydrothermolysen leicht plastisch verformbar, so dass in diesem Prozess, durch das Einschalten eines Pressvorgangs

der noch feuchten Hölzer, komprimiertes Holz hergestellt werden kann. Thermisch vergütetes und verdichtetes Holz soll für tragende Anwendungen im Ingenieurholzbau eingesetzt werden können. Die Eignung dieses Kombinationswerkstoffes wird untersucht.

### 6.3 Öl-Hitze-Verfahren

Ende der 1990er Jahre entwickelte die Firma Menz-Holz zusammen mit der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH) das Öl-Hitze Verfahren. 2000 begann die industrielle Produktion. Die Kurzbezeichnung OHT ist vom englischen Oil-heat treatment abgeleitet. Beim Öl-Hitze-Verfahren wird das zu behandelnde Holz in einem Bad aus pflanzlichen Ölen erhitzt. Die Behandlung erfolgt vorwiegend drucklos im Temperaturbereich von 180°C bis 260°C. Die eigentliche Behandlungsdauer beträgt bis zu 4 Stunden, die gesamte Prozessdauer bis zu 18 Stunden. Durch das Ölbad wird ein vollständiger Luftabschluss bewirkt und damit oxidative Abbaureaktionen am Holz reduziert. Die während der Behandlung austretenden Gase verhindern weitestgehend die Aufnahme von Öl, so dass die Ölaufnahme – je nach Holzdimension – 20 bis 40 kg/m<sup>3</sup> meist nicht übersteigt. Die Holzoberfläche ist daher nach der Behandlung trocken. Bei Bedarf kann die Ölaufnahme jedoch durch eine Veränderung der Prozessparameter erheblich gesteigert werden. Für die Öl-Hitzebehandlung wird technisch getrocknetes Laub- und Nadelholz verwendet.

Zusätzlich zu der thermischen Modifikation durch die Hitze dringt das Öl in die äußeren Zellen ein und bewirkt somit einen zusätzlichen Schutzeffekt, der das Holz hydrophob werden lässt.

### 6.4 Inertgas-Verfahren

Ein in Stickstoffatmosphäre arbeitender Hitzebehandlungsprozess wurde in den 1980er Jahren in

Frankreich entwickelt und 1997 durch die New Option Wood SA (NOW) industriell umgesetzt. Bei diesem Verfahren wird, statt mit Wasserdampf oder Öl, mit Stickstoff unter erhöhtem Druck gearbeitet. Die einstufige thermische Modifikation erfolgt in einer Behandlungskammer mit einem Restsauerstoffgehalt von unter 2% und bei Temperaturen von 200 bis 260°C für bis zu 3 Stunden. Es können getrocknete Laub- und Nadelhölzer behandelt werden. Der Prozess ist auch bekannt als Retifikations- oder Torrefikationsprozess. Das thermisch modifizierte Holz wird auch als retifiziertes Holz angeboten.

## 7 Ökonomie

Die Herstellungskosten für thermisch modifiziertes Holz setzen sich zusammen aus der Anlageninvestition, den Rohstoff- und Prozesskosten, der Ausbeute und den Weiterbearbeitungskosten. Die Kosten von Hitzebehandlungsanlagen sind abhängig vom jeweiligen Verfahren und von der Kapazität der Anlage. Da bei allen Hitzebehandlungsverfahren unterschiedliche Holzarten eingesetzt werden können hängen die Herstellungskosten zum großen Teil von der eingesetzten Holzart sowie der Qualität und Dimension des Holzes ab. Eine gute Rohstoffqualität ist notwendig, da nur so die notwendigen Produktqualitäten erfüllt werden können. Die Prozesskosten variieren je nach Verfahren und sind abhängig von den Beschaffungskosten, wie auch den Rückgewinnungs- bzw. Entsorgungskosten des Wärmeleitmediums, der benötigten Energie, der Dauer der Behandlungs- und Aushärtungsphase sowie dem Zeitbedarf für Beschickung und Entladung und der Auslastung der Anlage. Eine geringere Auslastung führt zu höheren Preisen. Zudem sind die Prozesskosten von der behandelten Holzart abhängig, da Temperatur und Dauer angepasst werden. Die Ausbeute wird vor allem durch die Rohstoffqualität bestimmt. Höhere Weiterbearbeitungskosten gegenüber unbehandeltem Holz können sich vor allem durch die erhöhte Sprödig-

keit des Materials ergeben, was z.B. langsamere Vorschubgeschwindigkeiten beim Hobeln zur Folge hat.

### 8 Produktionskapazität

Seit Beginn der Thermoholzproduktion steigt die Kapazität in Europa kontinuierlich an. Dies hängt auch damit zusammen, dass ständig neue Firmen hinzukommen, die entweder unter Lizenz der großen Anbieter produzieren oder neue Verfahren entwickeln, welche an die etablierten Verfahren angelehnt sind.

In Deutschland gibt es neben der Menz Holz AG, welche das Öl-Hitze-Verfahren entwickelt hat, in der Zwischenzeit noch weitere Anbieter. Mit 6000 m<sup>3</sup>/a ist die Firma Thermoholz Spreewald GmbH, die seit 2005 produziert, momentan der größte deutsche Hersteller. Obwohl man sich im Vergleich zum Holzmarkt allgemein auf einem niedrigen Niveau bewegt, ist Thermoholz mit über 100 000 m<sup>3</sup>/a in Europa das Modifikationsverfahren mit dem größten Absatz, was sicherlich auch daran liegt, dass thermisch modifiziertes Holz am längsten am Markt vertreten ist. Im Verhältnis zum Holzmarkt allgemein muss auch beachtet werden, dass TMT ein veredeltes Holzprodukt ist und aufgrund seiner höheren Kosten nur für bestimmte Einsatzzwecke verwendet wird.

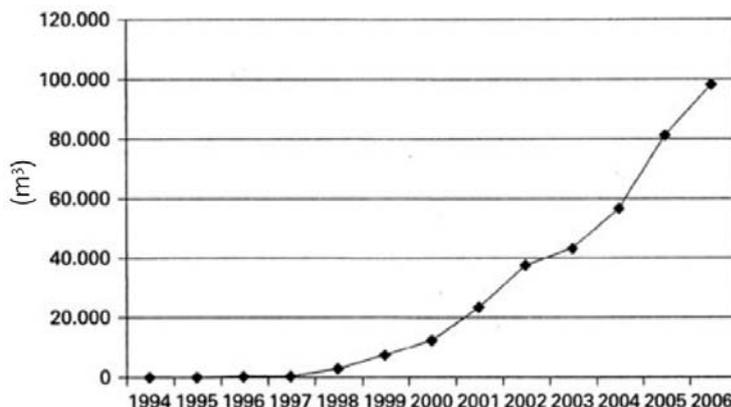


Abb. 4: Thermoholzproduktion in Europa

### 9 Ökologie

Bei der Hitzebehandlung von Holz kommt es zu einer teilweisen Auflösung von Bestandteilen der Zellwand. Diese Abbauprodukte entweichen als Gas und Kondensat. Damit diese nicht in die Umwelt gelangen und zu Geruchsbelästigungen führen werden sie kontrolliert verbrannt. Bei den Verfahren die Dampf einsetzen befinden sich organische Verbindungen und Extraktstoffe aus dem Holz im Abwasser. Das Abwasser kann in biologischen Kläranlagen gereinigt werden und stellt keine besonderen Anforderungen an die Abwasseraufbereitung dar.

Die Finnish Thermwood Association gibt für ihren Prozess an, dass der gesamte Energieverbrauch nur 25 % höher ausfällt als bei der herkömmlichen Holz Trocknung, da die Energie hauptsächlich für die Trocknung des Holzes erforderlich ist, die ca. 80 % der verwendeten Wärmeenergie benötigt.

Die Entsorgung von thermisch modifiziertem Holz ist problemlos möglich, da dem Holz bei der Herstellung keine Stoffe zugesetzt werden. Bei der thermischen Verwertung entstehen ca. 30 % weniger Energie weil dem Holz ein großer Teil der energiereichen Bestandteile bei der Wärmebehandlung entzogen wurde.

### 10 Gesundheit

Während des Wärmebehandlungsprozesses werden dem Holz keine chemischen Zusätze beigegeben. Daher ist es gesundheitlich unbedenklich.

Der rauchige Geruch, den TMT am Anfang hat, vergeht nach einiger Zeit oder kann durch eine Beschichtung der Oberfläche verhindert werden. Er stammt hauptsächlich vom Furfural, das freigesetzt wird. Untersuchungen haben ergeben, dass das Gesamtvolumen der freigesetzten Emissionen von wärmebehandelter Kiefer nur einen Teil von unbehandelte ausmacht.

Bei der Bearbeitung entstehender Staub hat deutlich kleinere Partikel als Staub von unbehandeltem Holz. Daher sollte bei der Bearbeitung eine Schutzmaske getragen werden. Krebs erregende Verbindungen wurden aber keine festgestellt.

### 11 Normung

TMT ist bisher nicht in Normen berücksichtigt. Dies zeigte das INS-Projekt „Normung und Standardisierung von thermisch modifiziertem Holz“, das 2006 vom IHD im Auftrag des DIN bearbeitet und im Rahmen des BMWi-Programms „Innovation mit Normen und Standards“ (INS) gefördert wurde. Im Rahmen des Projektes wurden 134 Produkt- bzw. Anwendungsnormen sowie 120 Prüfnormen aus dem Holzbereich auf ihre Relevanz zu TMT und hinsichtlich kritischer Punkte und Defizite überprüft. Als Ergebnis wurden zahlreiche Hinweise für Normungsgremien erarbeitet, die bei der Überarbeitung oder Erstellung von Normen berücksichtigt werden können. Des Weiteren wurden spezielle Prüfmethode für TMT entwickelt, recherchiert bzw. vorgeschlagen.

Derzeit ist in Deutschland eine Verwendung von thermisch modifiziertem Holz für tragende und aussteifende Bauteile ohne geeigneten Verwendbarkeitsnachweis nicht zulässig. Dies ergibt sich insbesondere durch die in der Regel verringerte Tragfähigkeit und das veränderte Bruchverhalten von TMT gegenüber unbehandeltem Holz, sowie durch das Fehlen statistisch abgesicherter Werte für Berechnungen. Vor allem aber durch Forderungen aus dem Baurecht, da TMT ist nicht als geregeltes Bauprodukt anzusehen ist, weil seine Eigenschaften wesentlich von geregelten Bauprodukten (für das Bauwesen verwendbare Holzarten gemäß Bauregelliste A) abweichen.

Mit der europäischen technischen Spezifikation CEN/TS 15679 „Thermisch modifiziertes Holz – Definitionen und Eigenschaften“ liegt nun ein erstes normatives Dokument für thermisch modi-

fiziertes Holz vor. Die technische Spezifikation beinhaltet grundlegende Definitionen, geht auf wichtige Eigenschaften ein und zeigt auf, wie diese zu bestimmen sind.

### 12 Qualitätssicherung

Unabhängig von den eigenen Varianten der Qualitätssicherung und der Produktionskontrolle der Hersteller bestehen in Finnland, den Niederlanden und Deutschland spezielle Systeme zur Qualitätssicherung für die Herstellung wie auch die Produkte von thermisch modifiziertem Holz. In Deutschland wurde das „Gütezeichen TMT“ entwickelt, welches von der Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH (EPH) in Dresden vergeben wird.



Abb. 5: Gütezeichen TMT

Das Qualitätszeichen bezieht sich jeweils auf ein bestimmtes TMT-Sortiment. Die Vergabe erfolgt für die drei Verwendungsbereiche innen (interior), außen ohne Erdkontakt (exterior) und außen mit Erdkontakt (exteriorPlus). Für die Erteilung des Gütezeichens müssen bestimmte Mindestanforderungen erfüllt werden. Neben der Überprüfung physikalischer Eigenschaften müssen je nach Verwendungsbereich weitere Anforderungen erfüllt werden. Bei Verwendung in Innenräumen müssen die Anforderungen des AgBB-Schemas an die Emissionen erfüllt werden. Für den Außenbereich muss mindestens die Dauerhaftigkeitsklasse 3 gemäß EN 350-1 bei Verwendung ohne Erdkontakt bzw. Dauerhaftigkeitsklasse 2 bei Verwendung mit Erdkontakt erreicht werden. Die Qualität des Ausgangsmaterials und die Pro-

zessüberwachung muss durch den Hersteller im Rahmen seiner werkseigenen Produktionskontrollen abgesichert werden. Die Vergaberichtlinien sind auf die europäische technische Spezifikation für TMT abgestimmt. Somit ist das Qualitätszeichen europaweit anwendbar.

In Finnland haben die Mitglieder der Finnish Thermowood Association das System „Thermowood Production and Product Quality Control“ etabliert. Schwerpunkte sind die Gütesortierung des Holzes sowie die Prozesskontrolle.

In den Niederlanden gibt es für Bauprodukte das KOMO-Zertifikat. Mit dem „National assessment directive for the KOMO product certificate Timber modification“ kann modifiziertes Holz zertifiziert werden. Im Gegensatz zu den Systemen in Deutschland und Finnland ist dieses Zertifikat nicht nur auf thermisch modifiziertes Holz beschränkt, sondern kann allgemein für modifiziertes Holz vergeben werden. Besonderes Augenmerk wird hier auf die Reproduzierbarkeit der Eigenschaftswerte für zertifizierte Produkte gelegt.

#### Quellen

- [1] Bächle, F.: Eigenschaften und Verwendung von Thermoholz, Institut für Baustoffe der ETH Zürich, 2006
- [2] Burmester, A.: Zur Dimensionsstabilisierung von Holz, Holz als Roh- und Werkstoff 33, Seite 333 – 335, Springer Verlag, Berlin, 1975
- [3] Burmester, A.: Einfluss einer Wärme-Druckbehandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit, Holz als Roh- und Werkstoff 31, Seite 237 – 243, Springer Verlag, Berlin, 1973
- [4] Die Plato-Technologie, Plato International BV, 2002
- [5] Dreimann, A.: Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit von Möbeln aus Sperrholz für den Außenbereich, Bachelor Thesis Kurzfassung, HAWK Hildesheim, 2007
- [6] Großmann, C. M.: Marktchancen für hitzebehandeltes Holz in Deutschland: Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, Verfügbarkeit und Marketing, Institut für Forstpolitik, Universität Freiburg, 2002
- [7] Holzschutz durch Holzmodifizierung, Sachverständigenbüro für Holzschutz, 2007
- [8] Krause, A.: Neue Materialien – neue Chancen für Holzfenster?, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2007
- [9] Militz, H.: Neuartige Verfahren der Holzmodifizierung für den Fenster- und Fassadenbau, ift Rosenheim, 2003
- [10] Militz, H.: Holzmodifizierung – Alternative Schutz- und Behandlungsverfahren, 22. Holzschutztagung der DGFH, Göttingen, 2000
- [11] Militz, H.: Übersichtsbericht – Acetyliertes Holz, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2001
- [12] Modifiziertes Holz – Eigenschaften und Märkte, Kurzfassung, Institut für Holzforschung, BOKU Wien, 2002
- [13] Paul, W.: Thermische Modifizierung von Spanmaterial und Holzwerkstoffplatten zur Verbesserung ausgewählter Eigenschaften, Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Universität Hamburg, 2006
- [14] Scheiding, W.: Begriffsdefinition TMT, Thermoholz, Merkblatt, Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH, 2007
- [15] Scheiding, W.: Beständigkeit der Farbtöne von TMT, Merkblatt, Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH, 2007
- [16] Scheiding, W.: Kurzinformation zu thermisch modifiziertem Buchenholz, Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH, 2007
- [17] Scheiding, W.: Verwendbarkeit thermisch modifizierter Hölzer für tragende und aus-

- steifende Bauteile, Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH, 2006
- [18] Scheiding, W.: Normung und Qualitätssicherung von thermisch modifizierten Hölzern, Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH, 2007
- [19] Teischinger, A.: Modifiziertes Holz, Institut für Holzforschung, BOKU Wien, 2003
- [20] Richter, R.: Neue Materialien und Beschichtungen für den Oberflächenschutz, Empa, Abteilung Holz, Dübendorf 2005
- [21] Vergaberichtlinien für das Qualitätszeichen TMT, Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH
- [22] Welzbacher, C. H.: Verhalten von nach neuen thermischen Modifikationsverfahren behandelte Fichte und Kiefer unter besonderer Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit gegenüber Holz zerstörenden Mikroorganismen, Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Universität Hamburg, 2007
- [23] Wepner, F.: Produktinnovationen durch Holzmodifizierung, Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Göttingen, 2005

#### **Normen**

- DIN CEN/TS 15679:2008-03  
Thermisch modifiziertes Holz – Definitionen und Eigenschaften; Deutsche Fassung

#### **Linkliste**

- [www.tmt.ihd-dresden.de](http://www.tmt.ihd-dresden.de)  
Internetseite des Instituts für Holztechnologie Dresden gGmbH Informationen und Merkblätter über TMT

## 8.2 Modifiziertes Holz

### Modifikation mit holzersetzenen Pilzen

#### 1 Allgemeines

Bei der Modifikation von Holz mit holzersetzenen Pilzen handelt es sich um ein Verfahren zur biologischen Modifizierung von Holz. Durch den Einsatz holzersetzenen Pilze wird diese Art der Modifikation auch als mykologische Modifikation bezeichnet. Ziel ist das Erreichen einer besseren Imprägnierbarkeit bestimmter Holzarten. Deshalb handelt es sich nicht um eine Modifikation im eigentlichen Sinne, sondern die Behandlung stellt lediglich einen Verfahrensschritt bei der Imprägnierung dar. Fichte und Tanne machen den größten Anteil sowohl beim Waldbestand, als auch in der Verarbeitung zu Bauholz aus. Das Holz dieser Bäume eignet sich durch seine guten Festigkeitseigenschaften besonders als Bauholz. Allerdings ist es im unbehandelten Zustand nicht sehr dauerhaft. Erschwerend kommt hinzu, dass sich das Holz, aufgrund seines anatomischen Aufbaus, nur unzureichend mit Holzschutzmitteln tränken lässt. Eine Vorbehandlung durch eine Bohr- und Schlitzperforation bringt zwar ein verbessertes Eindringverhalten mit sich, es wird jedoch keine durchgängige Imprägnierung erzielt. Diese Voraussetzungen schränken den Einsatz der beiden Holzarten, zum Beispiel als Bauholz im Außenbereich, massiv ein.



Abb. 1: Bohrperforation [3]

Um diese negative Eigenschaft zu verändern macht man sich einen „Schädling“ zu Nutze. Pilze sind dafür bekannt, dass sie Holz zersetzen.

Die verschiedenen Pilzarten tun dies auf unterschiedliche Weise. Diese negative Eigenschaft der Pilze kann jedoch, wenn sie gezielt eingesetzt wird, positive Veränderungen mit sich bringen. Die Holz abbauende Wirkung der „Schädlinge“ wird zweckentfremdet. Als „Nützlinge“ werden sie eingesetzt, um bestimmte Holzeigenschaften gezielt zu verbessern.



Abb. 2: Imprägniertes Nadelholz nicht vorbehandelt (links) und mit Bohrperforation (rechts) [3]



Abb. 3: Physisporinus vitreus (Wässriger Porling) [3]

Um die Imprägnierbarkeit von Fichten- und Tannenholz zu verbessern wird die Behandlung von Holz mit dem Weißfäuleerreger Physisporinus vitreus (Wässriger Porling) untersucht. Verantwortlich für die schlechte Imprägnierbarkeit dieser Holzarten sind vor allem die im getrockneten Holz „verschlossenen“ Hoftüpfel, bei denen der mittlere Teil der Tüpfelmembran zu einem so genannten Torus verdickt. Die Hoftüpfel dienen im lebenden Baum als Verbindungswege für Flüssigkeiten zwischen aneinandergrenzenden Zellen.

Durch den Weißfäuleerreger wird vorwiegend eine partielle bzw. völlige Auflösung der Tüpfelkomponenten erreicht. Dies führt zu einer Verbesserung der Durchlässigkeit des Holzes.

Im Laufe der Jahre sind unterschiedliche biotechnische Versuche unternommen worden, um die Wirkung des Tüpfelverschlusses im Fichtenholz rückgängig zu machen. Eine Erhöhung der Wegsamkeit des Fichtenholzes konnte mit dem alleinigen Einsatz von Enzymen nicht erreicht werden. Bisher wurde keine industrielle Anwendung erfolgreich umgesetzt. Im Gegensatz zu Bakterien und Enzymen bietet der Einsatz holzzeretzender Pilze, im Zusammenhang mit der gezielten Verbesserung der Wegsamkeit, wesentliche Vorteile. Der Abbau der Tori durch die enzymatische Wirkung von Weißfäuleerregern wurde 1987 erstmalig von Tsuneda beschrieben. Das Verfahren soll als Alternative und Verfahrensverbesserung für bisher in der Holzschutzpraxis eingesetzte mechanische Vorbehandlungen wie die Bohrperforation dienen.

## 2 Einsatzgebiete

Das Haupteinsatzgebiet dieses Verfahrens soll nach erfolgreicher Umsetzung die Verbesserung der Aufnahmefähigkeit, Verteilung und Eindringtiefe von Imprägniermitteln in Nadelhölzern sein und als Alternative und Verfahrensverbesserung für bisher in der Holzschutzpraxis eingesetzte mechanische Vorbehandlungen, wie Bohrperforation dienen.

## 3 Physikalische Einflussfaktoren

Das Verfahren ist auf die Behandlung von Fichten- und Tannenholz ausgelegt und wird für diese Holzarten weiterentwickelt. Die Behandlung von Vollholz und Schnittholz ist möglich.

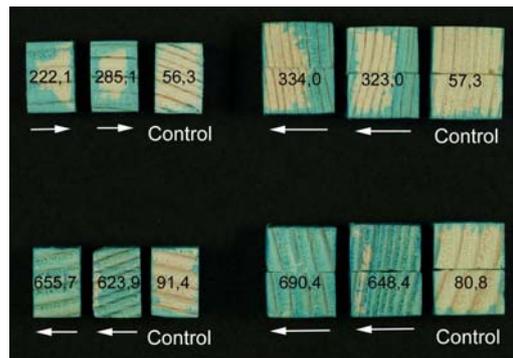


Abb. 4: Untersuchung der Tränkbarkeit an behandelten und Kontrollproben Fichte (obere Reihe) und Tanne (untere Reihe) [3]

## 4 Veränderung der materialtechnischen Eigenschaften

### 4.1 Verbesserung der Wegsamkeit

Nach einer Inkubationszeit von 6 Wochen wurde eine Zunahme der Tränkbarkeit von 300 bis 400 % bei Fichtenkernholzproben und 500 bis 600 % bei Tannenkernholzproben erreicht, ohne nennenswerte Masseverluste zu verursachen. Die Kernholzproben der Tanne waren homogen und über den ganzen Querschnitt verbessert. An den Kernholzproben von Fichte konnte zum Teil nur eine heterogene Verbesserung festgestellt werden, welche auf die einseitige Besiedelung der Holzproben durch das Pilzmyzel während der Inkubationszeit zurückzuführen ist. Der enzymatische Abbau der Tüpfelmembranen durch Weißfäuleerreger ist hervorragend geeignet um die Wegsamkeit des Kernholzes zu erhöhen und das Eindringen von fungizid ausgestatteten Grundierungen und Lasuren für die Oberflächenbehandlung zu verbessern.

### 4.2 Oberflächenbehandlung

Es wurden Tests mit verschiedenen Oberflächenbehandlungsmitteln durchgeführt, die im Tauch- oder Streichverfahren aufgebracht wurden. Dafür wurden die Hölzer 28 Tage mit dem Weißfäuleerreger vorbehandelt. Es zeigten sich keine Unterschiede sowohl bei der Aufnahmemenge der

Oberflächenbehandlungsmittel, als auch bei der Eindringtiefe zwischen behandelten und unbehandelten Proben. Bei den behandelten Proben waren zwischen der direkt mit Pilzen behandelten Vorderseite und der Rückseite auch keine Unterschiede erkennbar. Das Eindringverhalten ist vom verwendeten Oberflächenbehandlungsmittel abhängig. Die Eindringtiefe zwischen Tauch- und Streichverfahren ist gleich.

Eine verbesserte Dauerhaftigkeit wird nicht durch eine bessere quantitative Aufnahme der Anstrichsysteme sondern durch eine Verbesserung der Verankerung der Oberflächenbeschichtung erreicht.

#### **4.3 Biologische Wirksamkeit von konventionellen Oberflächenanstrichen gegen Bläue- und Schimmelpilze**

6 Anstrichsysteme wurden nach DIN EN 152.1 jeweils sowohl ohne, als auch mit 6-wöchiger Vorconditionierung durch den Weißfäuleerreger auf Kiefernspiltholz und zusätzlich auf Fichtenholz geprüft.

Bei unbehandelten Fichtenkernholzproben zeigte sich über den ganzen Querschnitt eine schwache und unregelmäßige Verblauung. Im Gegensatz dazu konnte unabhängig vom Anstrichsystem an den pilzvorbehandelten Fichtenkernholzproben eine deutliche, bläuefreie Zone nachgewiesen werden. Wasserlösliche Anstrichsysteme auf vorbehandeltem Fichtenkernholz zeigten ein deutlich besseres Eindringverhalten.

#### **4.4 Schlagbiegeversuch**

Zur Überprüfung der Festigkeit wurde Fichten- und Tannenkernholz mit unterschiedlichen Inkubationszeiten im Schlagbiegeversuch getestet.

Nach 6 Wochen Vorbehandlung wurden in allen Holzproben nur geringfügige Masseverluste mit weniger als 1 % verzeichnet. Es kam zu keinen

signifikanten Festigkeitsverlusten bei Fichte. Bei der Tanne konnte jedoch eine signifikante Minderung der Festigkeit verzeichnet werden. Die Festigkeitsabnahme dürfte in Zusammenhang mit der schnelleren und homogeneren Besiedelung des Tannenholzes durch den Weißfäuleerreger stehen.

Nach 12 und 18 Wochen konnten an beiden Holzarten moderate Masseverluste festgestellt werden. Diese gingen mit einer deutlichen Minderung der Festigkeit einher. Nach 18 Wochen betrug die Festigkeitsverluste 43 und 62 %, bei Masseverlusten zwischen 5 und 10 %.

Ein im Vergleich dazu eingesetzter Braunfäuleerreger verursachte nach 18 Wochen drastische Masse- und Festigkeitsverluste. Die Masseverluste lagen zwischen 18 und 23 %, der Festigkeitsverlust betrug sogar bis zu 94 %.

Ein Nachteil bei der Anwendung von holzersetzen Pilzen für biotechnische Zwecke besteht darin, dass bei zu langen Inkubationszeiten die Festigkeit im Holz nachteilig verändert werden kann.

#### **5 Vorgang**

Die Hyphen (Pilzfäden) von Weißfäuleerregern können das Splint- und Kernholz gleichmäßig und schnell besiedeln. Auffälligstes Merkmal des Holzersetzungsmusters von *Physisporinus vitreus*, an natürlich wie künstlich infiziertem Holz, ist die bereits im Frühstadium der Holzersetzung starke Zerstörung der Hoftüpfel zwischen den Tracheiden. Die Hoftüpfel dienen im lebenden Baum dem Flüssigkeitsaustausch zwischen dem Festigungs- und Wassertransportgewebe, den Tracheiden, und dem Speichergewebe der Holzstrahlen, den Parenchymzellen. Bei der Bildung von Kernholz verkrusten die Hoftüpfel, während sie im Splintholz bei der Trocknung durch die Druckänderung von Holz verschlossen werden.

Durch diese beiden Vorgänge wird der Wassertransport zwischen benachbarten Tracheiden stark erschwert. Dies hat zur Folge, dass selbst nach einer Vakuum-Druckimprägnierung nur sehr geringe Eindringtiefen erreicht werden. Durch eine biotechnische Vorbehandlung des Holzes mit *Physisporinus vitreus* wird eine partielle bzw. völlige Auflösung der Hoftüpfel erreicht, da die Hyphen des Weißfäuleerregers bevorzugt die lignifizierten und inkrustierten Tüpfelmembranen im Kernholz abbauen und somit eine Verbesserung der Permeabilität des Holzes erreicht wird.

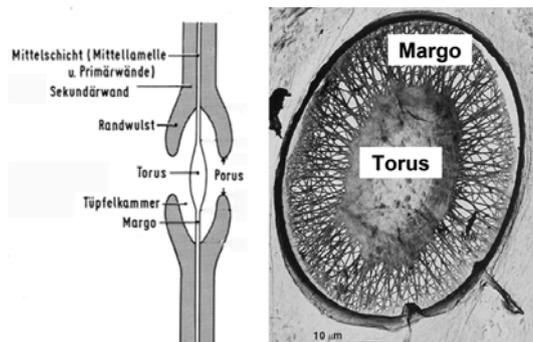


Abb. 5: Schematische Darstellung [2] und Schnitt durch Hoftüpfel [3]

Die erhöhte Tränkbarkeit von Fichten- und Tannenkernholz nach Vorbehandlung steht in Korrelation mit dem Abbau der Tori in den Tracheiden und Kreuzungsfeldtüpfeln im Holzstrahlparenchym. Dabei findet ein kontrollierter Abbauprozess statt. Da nur die Hoftüpfel abgebaut werden und keine elementaren Zellwandkomponenten, kommt es nicht zu einer signifikanten Minderung der Schlagbiegefestigkeit. Der Weißfäuleerreger kann nach der Behandlung im Holz überdauern. Daher muss das Wachstum des Pilzes nach der Behandlung mittels eines Fungizids oder durch Dampfsterilisation abgetötet werden.

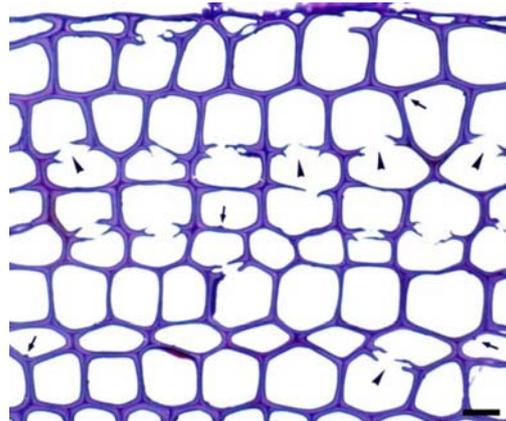
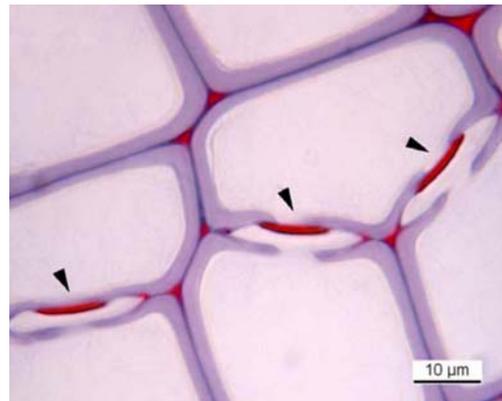


Abb. 6: Verschlussene (oben) und abgebaute Hoftüpfel (unten) [3]

## 6 Produktion

Die Erfahrungen die in diesem Projekt gemacht wurden beziehen sich auf den Einsatz im Labor. Da die Ergebnisse recht viel versprechend waren, soll das Verfahren zur weiteren Optimierung in einer Pilotanlage weiterentwickelt werden und zielt auf eine verkürzte Expositionszeit und homogenere Besiedelung des Holzes ab. Bei einer erfolgreichen Umsetzung im industriellen Maßstab könnte eine Vielzahl von Behandlungs- und Veredelungsprozessen für Fichtenholz effizienter und wertschöpfender gestaltet werden und die wirtschaftliche Nutzung dieser wichtigen Baumart maßgeblich verbessert werden.

### 7 Patent

Auf Grund der gemachten Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Schlussberichts wurde ein Antrag auf Erteilung eines Patents beim Deutschen Patentamt eingereicht.

### Quellen

- [1] Denzler, L.: Pilze verbessern das Klangholz für den Geigenbau, Neue Züricher Zeitung, 15.06.2005
- [2] Schwarze, F.; Richter, K.: Behandlung von Fichten- und Tannenkernholz mit *Physisporinus vitreus* zur Verbesserung der Wegsamkeit, Schlussbericht, Fond zur Förderung der Wald- und Holzforschung, 2006
- [3] Schwarze, F.: Biotechnologische Verfahren machen Fichten- und Tannenholz besser nutzbar, EMPA Abteilung Holz, 2007
- [4] Schwarze, F.: Pilze machen Fichten- und Tannenholz besser nutzbar, Jahresbericht EMPA, Dübendorf, 2007



## 8.2 Modifiziertes Holz

### DNA Modifikation von Bäumen

#### 1 Allgemeines

Bäume und Büsche weisen im Vergleich zu den meisten anderen wirtschaftlich genutzten Pflanzen eine extrem lange Lebensdauer auf. Damit verbunden ist auch die Eigenschaft, dass sie erst in einem gewissen Alter blühen und fruchten. Züchtungserfolge mit konventionellen Methoden lassen sich deshalb nur langfristig erzielen. Oft ist es erst nach Jahrzehnten möglich zu erkennen, ob ein herangezogener Baum die gewünschten Eigenschaften aufweist. Dies bedeutet für den Versuch Einfluss auf die Holzeigenschaften zu nehmen einen hohen Kosten- und Zeitaufwand in Forschung und Entwicklung.

Bäume als ortsfeste und langlebige Organismen müssen über viele Jahre mit unterschiedlichen biotischen und abiotischen Umweltbedingungen umgehen, ohne diesen räumlich ausweichen zu können. Dies können unter anderem potentielle Schädigungen durch holzerstörende Pilze und Insekten, Trockenheit bzw. Toleranzen gegen Temperaturschwankungen, belastete Böden (durch Schwermetall, hohen Salzgehalt, etc.), Stürme oder auch Spätfröste sein. Bäume sind somit in besonderem Maße auf eine hohe Anpassungsfähigkeit angewiesen. Eine Möglichkeit, die Anpassungsfähigkeit zu verbessern oder zu beschleunigen, könnte die DNA-Technik sein.

Ziele der DNA-Modifikation sind Veränderungen des Genmaterials der Bäume im Hinblick auf ein schnelles Wachstum und damit eine Steigerung der Holzmasse, eine Verbesserung der Holzqualität, Resistenzen gegen Schädlinge und Pflanzenkrankheiten, Robustheit und Dauerhaftigkeit. Weitere Ziele sind Herbizidresistenzen und Toleranzen gegenüber bestimmten Umweltfaktoren, wie erhöhten Salzgehalt im Boden, Dürre, Überflutung, Kälte, etc.

Im Hinblick auf die Steigerung der Biomasseproduktion und Veränderungen der Holzstruktur

konzentriert sich die Forschung im Wesentlichen auf die Ligninzusammensetzung und den Lignin-gehalt des Holzes, was insbesondere für die Papierindustrie interessant ist, da zur Papierherstellung das Lignin aufwendig herausgelöst werden muss.

Um schnell Erfolge zu erzielen, sind insbesondere schnell wachsende Gehölze, wie etwa die Pappel, von besonderem Interesse. In nur einem Jahr können sie bis zu vier Meter höher werden. Das macht sie als Lieferanten für nachwachsende Rohstoffe interessant. Insbesondere als Rohstoff für die Papierherstellung und als klimafreundlicher und kostengünstiger Brennstoff gewinnt sie zunehmend an Bedeutung. Ein weiterer Vorteil schnell wachsender Bäume ist außerdem die Fähigkeit, viel CO<sub>2</sub> zu binden. Diese Eigenschaften machen die Pappel besonders interessant für die Wirtschaft, was eine verstärkte Forschungsintensität zu Folge hat. Die Pappel ist nicht zuletzt deshalb der erste Baum, dessen Genom vollständig entschlüsselt wurde.

Das Genom der Waldbäume ist mit das komplexeste unter allen Lebewesen, viele Eigenschaften können nur mittels Transfers multipler Gene verbessert werden, hier steht die Wissenschaft jedoch noch ganz am Anfang.

Bei der Freisetzung von transgenen (d.h. genetisch veränderten) Bäumen und Büschen müssen vor allem deren zum Teil extrem lange Lebensdauer, die zum Teil sehr große Fernausbreitung von Pollen und Samen, die weit verbreitete Eigenschaft mit anderen Arten zu bastardieren und die Tatsache, dass Wälder sehr komplexe Ökosysteme mit vielfältigen Wechselwirkungen sind, berücksichtigt werden. Bei Freisetzungen von transgenen Gehölzen besteht über sehr lange Zeiträume die Möglichkeit, dass die eingebauten Genkonstrukte weiterverbreitet werden.

## 2 Modifikationen

Die wesentlichen Modifikationen mit denen sich die Gentechnik derzeit auseinandersetzt sind die Veränderung des Ligningehaltes und die Verbesserung der Schädlingsresistenz. Auch zur Sanierung von belasteten Böden könnten die transgenen Bäume eine Hilfe sein.

### 2.1 Lignin

Das größte industrielle Interesse und damit die größte finanzielle Ausstattung für die Holzforschung im Bereich der DNA-Modifikation besteht an der Veränderung des Ligningehaltes, was für die Anwendung im Bauwesen aber nur wenig interessant ist.

Den Ligninen kommen zwei wichtige Funktionen zu, zum einen als Festigungs- bzw. Stabilisierungselement in den sekundären Zellwänden der Holzfasern und des Leitungsgewebes und somit der Stabilisierung der Pflanze, zum anderen die Abwehr von krankheitserregenden Organismen, den sogenannten Pathogenen. Bei der Papierherstellung muss das Lignin aus den Pflanzenfasern durch Kochen in Sulfitlaugen herausgelöst werden, um die reinen Zellulosefasern zu gewinnen. Die Ligninentfernung stellt einen hohen Kostenfaktor dar und ist außerdem ein stark umweltbelastendes Verfahren, so dass die Papier- und Zellstoffindustrie stark an ligninarmem Holz interessiert ist.

Eine Modifikation des Ligningehaltes bringt aber nicht nur Vorteile mit sich, da Veränderungen im Ligningehalt oder in der Ligninzusammensetzung dramatische Folgewirkungen haben können, die bisher noch nicht abgeschätzt werden können. Zum einen ist zu bedenken, dass ligninärmere Bäume, bedingt durch die geringeren Stabilisierungselemente, stärker windwurfgefährdet sind, zum anderen ist auch eine höhere Pathogenanfälligkeit zu befürchten.

### 2.2 Schädlingsresistenz

Für alle Bereiche der Holzverwendung, also auch für die Verwendung im Bauwesen, interessant ist die Verbesserung der Schädlingsresistenz der Bäume bzw. des Holzes.

Durch Insektenfraß können im Forstbereich große Schäden entstehen. Plantagenwirtschaft begünstigt zudem die rasche Vermehrung von Schädlingen. Mit Hilfe der Transformation eines vielfach in der Gentechnik verwendeten Bodenbakteriums, des „*Bacillus thuringiensis*“ (Bt), das ein für Fraßinsekten giftiges Kristallprotein bildet, konnte mittlerweile auf mehrere Bäume erfolgreich eine Resistenz gegen Insektenfraß übertragen werden. Da das Bakterium als biologisches Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt wird und erst im Darm bestimmter Fraßinsekten in die giftige Variante umgewandelt wird, geht man davon aus, dass es für den Menschen harmlos ist.

Die transgen erzielte Eigenschaft von Pflanzen, bestimmte Gifte zu produzieren, die eine Resistenz gegenüber Schadinsekten bewirkt, birgt jedoch insbesondere bei Gehölzen die Gefahr der parallelen Entwicklung von giftresistenten Typen des Schadinsektes. Angesichts des hohen Lebensalters von Gehölzen und der raschen Generationenabfolge der Schadinsekten (meist mehrere in einem Jahr) erhöht sich hier die Wahrscheinlichkeit einer Anpassung der Insekten. Bei Versuchen in China mit transgenen Bäumen zeigten sich an den Bäumen nach einiger Zeit sogar Fraßschäden von Insekten, die bis dahin keine bedeutenden Schäden verursacht hatten, da man mit dem Fremdgen in den Hormonhaushalt der Pappeln eingegriffen hatte. Eine vollständige Schädlingsresistenz ist z.Z. somit wohl noch nicht möglich, vielmehr findet lediglich eine Art Austausch der für den Baum schädlichen Insekten statt.

### 2.3 Altlastensanierung

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von transgenen Bäumen ist die Sanierung von Böden, die mit Schwermetallen oder organischen Schadstoffen belastet sind (sog. Phytosanierung).

Glutathion spielt beim Schutz der Pflanze gegen verschiedene Stress- und Umweltfaktoren eine zentrale Rolle. Es kann toxische Verbindungen über chemische Reaktionen "entgiften". Transgene Pappeln mit erhöhter Glutathion-Konzentration haben in Gewächshaus-Untersuchungen ein großes Potenzial für die Aufnahme und Entgiftung von Schwermetallen und Pestiziden gezeigt. Es zeigte sich, dass gentechnisch veränderte Pappeln innerhalb eines Monats bis zu 15 Prozent des eingesetzten Cadmiums aufnehmen. Bei anschließend durchgeführte Freilanduntersuchungen an Standorten mit unterschiedlicher Schwermetallbelastung in Deutschland und Russland zeigte sich, dass sich die transgenen Pappeln mit erhöhter Glutathion-Konzentration über drei Vegetationsperioden bei extrem unterschiedlichen Klimabedingungen und geringen bis sehr hohen Schwermetallbelastungen als stabil erwiesen. Sie zeigten bei der Phytosanierung jedoch nur auf den stark belasteten Flächen und im Jugendstadium gegenüber dem Wildtyp einen Vorteil. Dies verdeutlicht, dass das Entgiftungssystem der transgenen Pappeln nur bei Bedarf aktiviert wird, d.h. wenn die Böden hoch belastet sind.

### 3 Forschung

Die Pappel ist die erste Baumart, deren Genom bekannt ist und die somit gentechnisch verändert werden kann. Sie ist darüber hinaus der Baum mit den meisten Freisetzungsvorversuchen weltweit. In China werden seit 2002 gentechnisch veränderte, insektenresistente Bt-Pappeln zur Wiederaufforstung großer Flächen eingesetzt. Auch in Europa steht die schnell wachsende Pappel vor einer Renaissance. Sie liefert nachwachsende Rohstoffe für die Papierindustrie und gewinnt als

klimafreundlicher und kostengünstiger Brennstoff zunehmend an Bedeutung. Damit wird auch die Pappelzüchtung wieder interessant. Die Gentechnik könnte dabei eine wichtige Rolle spielen.

Die Forschung mit transgenen Bäumen steht noch am Anfang und viele Risiken konnten noch nicht abschließend geklärt werden. Ein Risiko stellt der vertikale Gentransfer, also die Übertragung der eingeführten Gene in die nächste Generation dar. Sehr viele Bäume werden durch den Wind bestäubt, vielfach werden auch die Samen von vielen Baumarten durch den Wind transportiert. Für die Pappel trifft beides zu. In der Regel geht zwar der größte Teil des Pollenniederschlags in der Nähe der Ausgangsquelle nieder, bei Kiefern kann man allerdings noch in 300 m Entfernung von der Ausgangsquelle große Pollenmengen finden. Je nach Wetterlage können die Pollen außerdem in sehr hohe Luftschichten gelangen, so dass unter bestimmten Wetterbedingungen auch eine Verbreitung über mehrere hundert Kilometer ohne weiteres möglich ist. Da sehr viele Bäume und Büsche eine sehr starke Tendenz haben, mit anderen Arten zu hybridisieren, ist die Gefahr eines vertikalen Gentransfers besonders groß. Um diesen erfolgreich zu verhindern, wird derzeit bei verschiedenen Arten versucht, durch gentechnische Veränderungen männliche und/oder weibliche Sterilität zu erzeugen, die Pflanzen dürfen entweder gar nicht blühen oder keine fertilen Blüten ausbilden. Eine Gefahr besteht jedoch in der Instabilität der Gene, da bei Bäumen zum Teil schon nach relativ kurzen Zeiträumen Instabilitäten festgestellt werden konnten.

Eine weitere Möglichkeit, den vertikalen Gentransfer zu verhindern, könnte sein, nur die Chloroplasten-DNA zu verändern. Diese wird in der Regel nur über den Mutterbaum bzw. -strauch vererbt. Bei unseren Nadelbäumen ist diese Möglichkeit allerdings nicht gegeben, da bei ihnen die

Chloroplasten-DNA über die väterliche Linie vererbt wird. Je nach Nutzungsziel wäre es auch denkbar, die Bewirtschaftung von transgenen Bäumen nur über die Jugendphase hinweg zu betreiben, so dass die Bäume gar nicht zum Blühen kommen. Allerdings können transgene Veränderungen auch ungewünschte „Nebenwirkungen“ nach sich ziehen, was gegebenenfalls auch bedeuten könnte, dass es zu einem früheren Eintritt der Bäume in die fruchtbare Phase kommt, was bei Pappeln schon beobachtet werden konnte.

Die Gefahr eines horizontalen Gentransfers ist, glaubt man aktuellen Forschungen, deutlich geringer, als die des vertikale Gentransfers. Zwar gehen fast alle Gehölze eine intensive Symbiose mit im Boden lebenden Pilzen ein und bilden mit diesen zusammen eine sogenannte Mykorrhiza aus, dennoch zeigten untersuchte Pilze von transgenen Pappeln im Vergleich zum Wildtyp überraschenderweise nur geringe Unterschiede, obwohl die transgenen Pappeln bezüglich Aussehen etc. starke Veränderungen aufwiesen. Auch wenn die Pilze vielfach nicht wirtsspezifisch sind, mit verschiedenen Gehölzarten zusammenleben und zum Teil auch sehr unterschiedliche Standorte besiedeln können, scheint die Gefahr recht gering zu sein, Gene von veränderten Pappeln in Wildtypen zu übertragen. Untersuchungen dazu sind noch nicht abgeschlossen.

#### 4 Zusammenfassung

Ebenso, wie die Gentechnik in der Agrarwirtschaft umstritten ist, bietet auch die Verbreitung von gentechnisch veränderten Bäumen die Grundlage zahlreicher Diskussionen. Zwar könnten transgene Bäume zur schnellen Wiederaufforstung genutzt werden, da aufgrund der rasanten Abholzung der Wälder zur Gewinnung von Ackerland und für die Papierherstellung diese dringend notwendig geworden sind, dennoch sind solche Projekte durchaus kritisch zu betrachten. Insbesondere, weil Großplantagen als Aus-

gleichsmaßnahmen für CO<sub>2</sub>-Emissionen von Industriestaaten zum Emissionsrechtehandel „missbraucht“ werden könnten. Auch Firmen wie Toyota oder Shell besitzen eigene Biotechnologiezentren, in denen an Bäumen geforscht wird, die z.B. mehr CO<sub>2</sub> aufnehmen sollen – dadurch könnten die Konzerne den Emissionshandel effektiver nutzen.

Ein weiteres Problem ist, dass, im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Kulturen, Bäume über viele Jahre im Ökosystem verbleiben und ihr Erbgut z.T. über Hunderte von Kilometern verbreiten können. Die Auskreuzungsgefahr steigt daher um ein Vielfaches.

Die Tatsache, dass bisher noch keine dauerhaft sterilen Bäume erzeugt werden konnten, muss schließlich (vorerst) das „Killerkriterium“ für die zur Freisetzung transgener Bäume sein, da ein Gentransfer nicht ausgeschlossen werden kann.

Dem gegenüber stehen die Möglichkeiten der üblichen Selektionszüchtung zur Einflussnahme auf die Holzeigenschaften, welche aber einer starken Ergebnisstreuung unterliegen und insbesondere bei Pflanzen mit langen Lebenszyklen wie den meisten Bäumen mit langwierigsten Entwicklungsprozessen verbunden sind.

Auf der UN-Konferenz zur biologischen Vielfalt 2008 haben alle Länder Afrikas einen Antrag auf ein Moratorium von gentechnisch veränderten Bäumen gestellt, da die Risiken noch nicht abschätzbar sind. Kanada hingegen hat sich vehement gegen ein solches Moratorium gestellt. Dies zeigt auch das Potential, das reiche Industrienationen in der genetischen Veränderung von Bäumen und oftmals auch dem damit verbundenen Emissionshandel sehen.

In Deutschland sind generell Forschungen, welche mit der gentechnischen Veränderung von Or-

ganismen zu tun haben politisch und gesellschaftlich starker Kritik und Voreingenommenheit ausgesetzt. Hinzu kommen starke Einschränkungen bei der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen, was in der Folge eine effektive Forschung auf diesem Gebiet nahezu ausschließt. Die weitestgehenden Entwicklungen auf diesem Gebiet kommen derzeit aus Kanada und den USA.



Abb. 1: Genetische Horrorvision für den deutschen Wald ?! (Cartoon: Wolfgang Horsch)

#### Quellen

- [1] Interview mit Matthias Fladung, bioSicherheit
- [2] „Transgene Gehölze in der Forst- und Landwirtschaft“, Gentechnik-Nachrichten Spezial 7 (Juni 2001); Öko-Institut e.V.

#### Linkliste

[www.biosicherheit.de](http://www.biosicherheit.de)  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)

