

**Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft
Hamburg**

Leuschnerstraße 91 21031 Hamburg

Arbeitsbericht

Instituts für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes

Nr. 2002 / 01

September 2002

Druckdämpfen von Schnittholz

Torsten Riehl, Johannes Welling, Arno Frühwald

**Bundesforschungsanstalt
Für Forst- und Holzwirtschaft**

und das Holzwirtschaftliche Zentrum der

UNIVERSITÄT HAMBURG



E-Mail: riehl@holz.uni-hamburg.de

Tel: 040/73962619

Fax:040/73962480



Das Forschungsvorhaben AiF 12610 N „Druckdämpfen von Schnittholz“ wurde über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (DGfH), München, aus den Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V (AiF)., Köln, gefördert.

Für die Finanzierung des Forschungsvorhabens durch die AiF und die konstruktive und tätige Mitarbeit des projektbegleitenden Ausschusses sei an dieser Stelle gedankt.

Dipl. Holzwirt Torsten Riehl, Dr. Johannes Welling, Prof. Dr. Arno Frühwald

1	Einleitung	5
2	Zielsetzung	7
3	Vorgehensweise	8
4	Holzphysikalische und verfahrenstechnische Grundlagen	9
4.1	Einfluss der Temperatur auf ausgewählte Holzeigenschaften	9
4.2	Druckdämpfen von Holz	9
4.2.1	Verfahrenstechnik.....	9
4.2.2	Einfluss auf die Holzeigenschaften.....	12
4.3	Trocknen von Holz	13
5	Vorbereitende Tätigkeiten im Projekt	15
5.1	Inbetriebnahme der Druckdämpfanlage	15
5.2	Aufbau und Konfiguration eines neuen Farbmesssystems	16
6	Materialbeschaffung und Aufbereitung	20
6.1	Robinie	20
6.2	Pappel	20
6.3	Buche und Eiche	21
6.4	Eigenschaftsuntersuchungen nach dem Druckdämpfen	21
6.5	Bestimmung der Trocknungsqualität	22
6.5.1	Bestimmung der mittleren Holzfeuchte für jedes Versuchsbrett.....	22
6.5.2	Bestimmung der durchschnittlichen Holzfeuchte jeder Trocknungs- und Dämpfcharge.....	22
6.5.3	Grad der Verschalung (Mittenschnitt-Test).....	23
6.6	Bestimmung der Holzfarbe	23
6.7	Dimensionsstabilität, Sorptionsvergütung	23
6.8	Härte	23
6.9	Verleimbarkeit	23
7	Ergebnisse	25
7.1	Vorversuche mit Robinie	25
7.1.1	Erste Ergebnisse der Robiniendämpfung.....	25
7.2	Hauptversuche mit Robinie	26
7.2.1	Dämpfbedingungen	26
7.2.2	Untersuchungen der Farbe.....	27
7.2.3	Holzfeuchte.....	34
7.2.4	Verschalung.....	37
7.2.5	Sorptionsvergütung	39

7.2.6	Härte.....	41
7.3	Vorversuche mit Pappel	42
7.3.1	Erste Ergebnisse der Versuche mit Pappel.....	42
7.4	Hauptversuche mit Pappel	44
7.4.1	Dämpfbedingungen	44
7.4.2	Untersuchungen der Farbe.....	45
7.4.3	Holzfeuchte.....	47
7.4.4	Verschalung.....	48
7.5	Hauptversuche mit Buche	49
7.5.1	Dämpfbedingungen	49
7.5.2	Untersuchungen der Farbe.....	49
7.5.3	Holzfeuchte.....	51
7.5.4	Verschalung.....	51
7.6	Hauptversuche mit Eiche	51
7.6.1	Dämpfbedingungen	51
7.6.2	Untersuchungen der Farbe.....	52
7.6.3	Holzfeuchte.....	54
7.6.4	Verschalung.....	55
7.7	Weiterführende Untersuchungen zur Farbe	55
7.7.1	Farbhomogenisierung bei Eiche.....	55
7.7.2	Farbhomogenisierung bei Buche.....	57
7.8	Verleimung von druckgedämpftem Robinienholz.....	63
7.8.1	Versuchsaufbau.....	63
7.8.2	Ergebnisse der Querschugprüfung	64
7.8.3	Ergebnisse der Scherfestigkeitsprüfung.....	67
8	Auslegung und Kalkulation einer industriellen Anlage.....	69
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	73
	Literatur	74
	Abbildungsverzeichnis.....	77
	Tabellenverzeichnis	79

1 Einleitung

Das Dämpfen von Schnittholz ist ein seit langer Zeit bekanntes und in beträchtlichem Umfang durchgeführtes Verfahren in der Sägeindustrie. Hierbei wird normalerweise frisch eingeschnittenes Holz in gut isolierten Dampfkammern einer Sattdampfatmosfera bei Temperaturen zwischen 80°C und 95°C ausgesetzt. Gedämpft wird zum überwiegenden Teil das Holz der Rotbuche, in geringerem Umfang auch bestimmte Obsthölzer (z.B. Birnbaum, Pflaume) und verschiedene Exoten.

Durch die Temperatureinwirkung bei hohem Holzfeuchtegehalt ohne Trocknung soll bewirkt werden, dass:

- 1) die Farbe des Holzes gleichmäßig wird,
- 2) der Farbton verändert wird (meist Richtung rötlich-braun),
- 3) die Holzfeuchteverteilung gleichmäßig wird,
- 4) Wachstumsspannungen abgebaut werden.

Im Anschluß an das Dämpfen muss das Schnittholz getrocknet werden. Hierfür kommen die Freiluftvortrocknung sowie eine Reihe von technischen Trocknungsverfahren (Frischluff/Ablufttrocknung, Kondensationstrocknung, Vakuumtrocknung) in Frage. In der Endphase der technischen Trocknung erfolgt in aller Regel eine sogenannte Konditionierung, bei der das Schnittholz über mehrere Stunden bei möglichst hohem Temperaturniveau einer erhöhten relativen Luftfeuchte ausgesetzt wird. Hierdurch wird bewirkt, dass die während der Trocknung entstandenen Feuchtegradienten über den Brettquerschnitt und innerhalb einer Trocknerladung ausgleichen und die Trocknungsspannungen abgebaut werden.

Farbveränderung und Spannungsreduktion bei Schnittholz lassen sich mit den bisher eingesetzten Verfahren wie Dämpfen vor der Trocknung oder dem Konditionieren am Ende des Trocknungsprozesses nur in getrennten Verfahrensschritten durchführen. Dabei ist der Zeitaufwand zur Erzielung der gewünschten Farbveränderung durch das Dämpfen und für eine Konditionierung mit dem Ziel des Spannungsabbaus durch die Temperaturbegrenzung auf knapp 100°C bei herkömmlichen Dämpf- und Trocknungsanlagen relativ hoch. Hohe Temperaturen oberhalb von 100°C sind aber für eine Wärmebehandlung von Holz von Vorteil, da sämtliche Reaktionen im Holz, Farbveränderung und Spannungsreduzierung, erheblich beschleunigt werden.

Durch die verstärkt einsetzende Plastifizierung oberhalb 100°C werden durch den Trocknungsprozess entstandene Spannungen im Holz effektiver und schneller abgebaut. Zusätzlich lässt sich eine Dimensionsstabilisierung und

Sorptionsvergütung erzielen, deren Ausmaß in erster Linie vom erreichten Temperaturniveau und von der Einwirkzeit der Wärmebehandlung abhängig ist. Allerdings bereitet es bei Verfahren, die mit atmosphärischem Druck arbeiten, große Probleme zu verhindern, dass das Holz bei diesen hohen Temperaturen geschädigt wird.

Als Alternative bietet sich für eine Wärmebehandlung mit Temperaturen oberhalb 100°C eine Dämpfung unter Überdruck an. Mit einem Überdruckkessel könnten Konditionierung und Farbveränderung in einem Verfahrensschritt durchgeführt werden.


2 Zielsetzung

Im Rahmen des Projektes soll die Verfahrenstechnik für das Druckdämpfen von Schnittholz im frischen und getrockneten Zustand erstmals intensiv untersucht und optimiert werden. Dies erfolgt gezielt im Hinblick auf die Verbesserung bzw. Beeinflussung bestimmter Holzeigenschaften (Farbänderung, Homogenisierung der Holzfarbe, Spannungszustand, Dimensionsstabilität, Sorptionsverhalten, Härte, Verleimbarkeit) am Beispiel von Rotbuche (für Möbel und Parkett) und Robinie (für Fenster und Parkett).


Es soll gezeigt werden, dass durch die Anwendung des Druckdämpfverfahrens die Dämpfzeit gegenüber dem konventionellen Dämpfen bei Temperaturen unter 100°C drastisch reduziert werden kann, bei gleichzeitiger Verbesserung bestimmter Qualitätsmerkmale. Außerdem soll gezeigt werden, dass durch die Anwendung des Druckdämpfverfahrens bei getrocknetem Material auf die zeitaufwendige Konditionierung im Anschluss an die technische Trocknung verzichtet werden kann.

Durch den mittlerweile von den Jahreszeiten fast unabhängigen Einschlag von Laubhölzern sowie auch durch die immer wieder auftretenden Kalamitäten, fällt Material auch außerhalb der Wintermonate an (Koch et al. 2000), (Luostarinen et al. 2002). Zur Verfärbung neigende Laubhölzer, wie z.B. die Buche aus solchen Sortimenten weisen nach der Trocknung oft ungewünschte Farbabweichungen auf. Durch Druckdämpfen nach der Trocknung soll versucht werden, die Farbe bei ungleichmäßig verfärbtem Material anzugleichen.


3 Vorgehensweise




- Ein am Institut für Holzphysik der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft bereits vorhandener Großautoklav ist für die im Rahmen des Forschungsprojektes geplanten Untersuchungen so zu modifizieren, dass er für die Versuche verwendet werden kann.




- Schnittholz verschiedener Holzarten (Buche, Robinie, u.a.) ist zu beschaffen und für die Versuche vorzubereiten.




- Frisches und getrocknetes Schnittholz wird bei Dämpftemperaturen zwischen 100° und 140°C für unterschiedliche Zeiten einer Sattdampfatmosphäre ausgesetzt.



- Farbe, Holzfeuchte, Spannungszustand sowie verschiedene physikalische und technologische Eigenschaften werden ermittelt.



- Verfahrenstechnische Grundlagen sowie Eckwerte für eine ökonomische Betrachtung werden erarbeitet.



- Die Ergebnisse werden in Form von Handlungsanweisungen für die Praxis aufbereitet.

4 Holzphysikalische und verfahrenstechnische Grundlagen

4.1 Einfluss der Temperatur auf ausgewählte Holzeigenschaften

In der einschlägigen Literatur über Holz und Holzeigenschaften wird der Einfluss der Temperatur auf die Holzeigenschaften bereits seit langem ausführlich beschrieben, z.B. *Kollmann 1951*. Die Temperatur beeinflusst maßgeblich die nachfolgend aufgeführten Holzeigenschaften:

- Schwindung, Quellung, Sorption
- Farbe
- Festigkeit

4.2 Druckdämpfen von Holz

4.2.1 Verfahrenstechnik

Unter Atmosphärendruck, bei Temperaturen oberhalb von 100°C (Bild 1), treten bei Schnittholz starke Trocknungseffekte auf. Jedoch kommt es beim Druckdämpfen von Schnittholz oberhalb 100°C bei getrocknetem Schnittholz zu keiner nennenswerten Veränderung der Holzfeuchte, da unter Überdruck im Dämpfkessel Sattdampfbedingungen vorliegen.

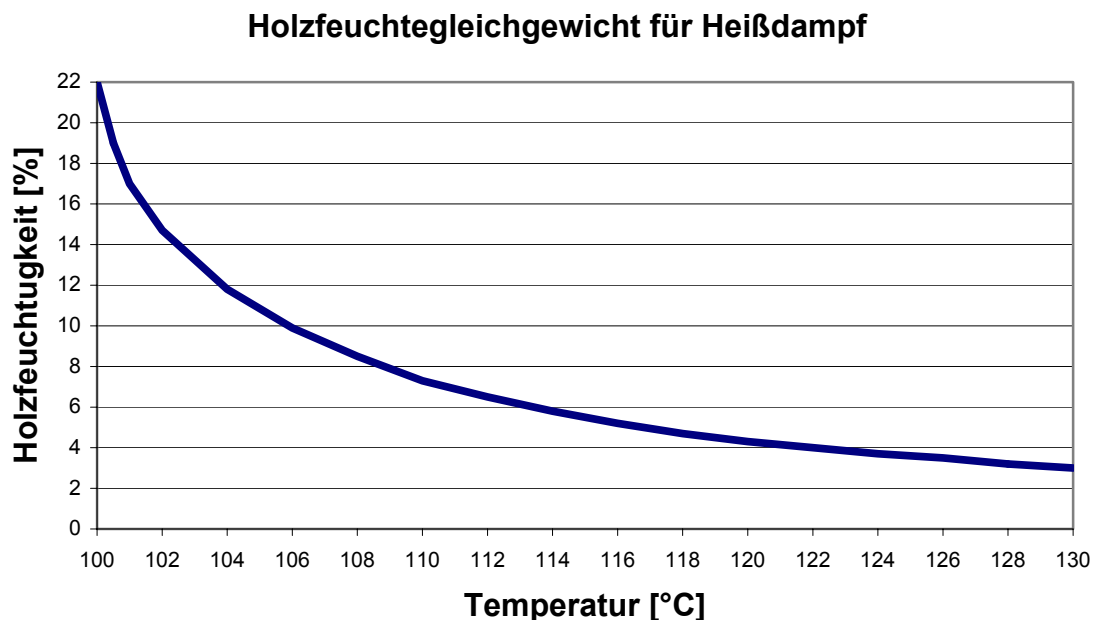


Bild 1 Holzfeuchtegleichgewicht oberhalb 100 °C nach Keylwerth 1949

Temperaturen von über 100°C bei der Trocknung oder einer Wärmebehandlung unter Atmosphärendruck führen wegen der geringen

Gleichgewichtsfeuchten meist zu einer starken Übertrocknung des Materials (Rosen 1980), die weit unter der geforderten Holzfeuchte für die meisten Anwendungen für Schnittholz liegt (Pang, Simpson, Haslett 2001).

Bei der Druckdämpfung mit Temperaturen oberhalb 100°C liegen jedoch Sattdampfbedingungen vor, die durch die Verschiebung des Siedepunktes von Wasser und unter Ausschluss von Luft keinen bzw. nur einen geringen Trocknungseffekt bewirken (Keylwerth 1949). Der Trocknungseffekt lässt sich aber nicht vollständig ausschließen, da immer ein gewisser Teil an Restluft während des Aufheizens im Dämpfkessel verbleibt. Die Gleichgewichtsfeuchten für das Holz bei Bedingungen über 100°C unter Überdruck wurden von *Shubin 1990* ermittelt und sind bei Key, Langrish und Walker 1999 aufgeführt. Sattdampfbedingungen liegen aber nur während der Dämpfphase vor, wenn die Temperatur im Kessel über 100°C nach vollständiger Durchwärmung des Dämpfguts beträgt. Beim Aufheizen und Abkühlen liegen unterschiedliche Bedingungen mit Wirkung auf die Holzfeuchte vor.

Der Druckdämpfprozess lässt sich in drei Phasen aufteilen.

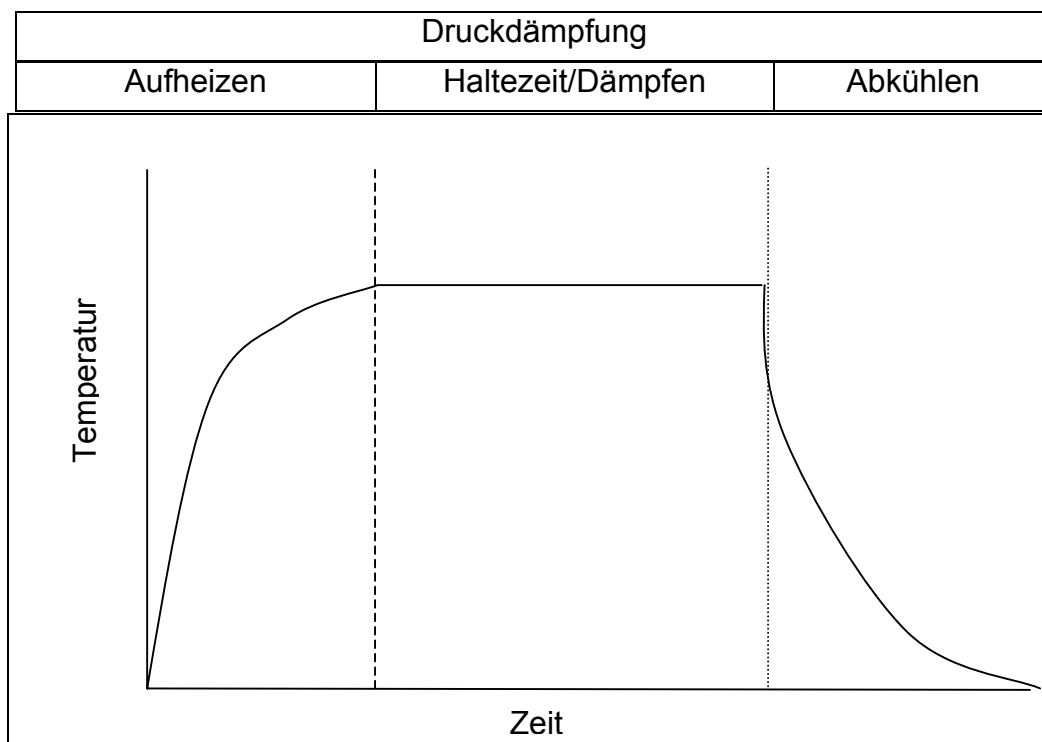


Bild 2 Temperaturverlauf bei der Druckdämpfung

Aufheizen

Während des Aufheizens kondensiert Dampf auf der Holzoberfläche. Dies

führt bei getrocknetem Material zur Erhöhung der Holzfeuchte in den oberflächennahen Schichten. Die Wärmeübertragung wird durch die Zunahme der Feuchte gefördert. Die Aufheizphase ist abgeschlossen, wenn das Dämpfgut die gleiche Temperatur wie die Dampfatosphäre im Druckdämpfkessel erreicht hat. Die im Holz enthaltene Luft expandiert und wird zum überwiegenden Teil durch Wasserdampf ersetzt. Eine Schädigung des Holzes kann für den Aufheizvorgang ausgeschlossen werden. Beim Aufheizen werden im Holz vorhandene Trocknungsspannungen durch die Reduzierung von Feuchtegradienten abgebaut.

Haltezeit

Nach der Aufheizphase findet eine relativ konstante Wärmezufuhr statt. Wärmeverluste der Anlage werden durch Nachheizen ausgeglichen. Die Bedingungen für das Dämpfgut sind während der Haltezeit konstant. Schwankungen der Temperatur werden lediglich durch das Verhalten der Temperaturregelung verursacht.

Dämpfen

Die Dämpfung kann in zwei Varianten durchgeführt werden.

- a) Nach der Aufheizphase wird die Luft aus dem Kessel abgelassen, so daß eine reine Heißdampfathmosphäre vorliegt.
- b) Die beim Beginn der Aufwärmphase im Kessel befindliche Luft verbleibt im Kessel, so daß der Partialdruck der Luft während der Dämpfung erhalten bleibt.

Durch die beiden Varianten ergibt sich ein unterschiedliches Verhalten der Anlage. Während des Heizens tritt der Dampf aus dem Heizkessel in den Behälter über, so daß bei der Variante a) der Widerstand des Luftdruckes nicht dem Druck des Wasserdampfes entgegengesetzt ist. Der Zeitraum vom Einschalten der Heizung bis zum Ansteigen der Temperatur im Kessel ist kürzer. Die Abkühlung nach dem Abschalten ist geringer, da die fehlenden Moleküle der Luft die Wärme nicht auf die Kesselwände übertragen können. Für die Variante b) ergeben sich demnach bei gleicher Dämpfzeit weniger Einschaltvorgänge für die Heizung.

Abkühlphase

Der Abkühlvorgang unter Druck ist bei der Druckdämpfung zwingend erforderlich. Bei sofortigem Druckausgleich des Kessels zum Umgebungsdruck siedet das Wasser im Holz bei Temperaturen von über 100°C. Durch das hierdurch entstehende Absolutdruckgefälle zwischen Holz

und Umgebung kommt es insbesondere an Stellen mit hoher Holzfeuchte zu Trocknungseffekten und an lokalen Schwachstellen (z.B. Holzstrahlen) besteht die Gefahr der Rissbildung.

Der zu Beginn der Dämpfung vorherrschende Partialdruck der Luft wird nach dem Abkühlen wieder erreicht. Wird die Luft nach dem Aufheizen aus dem Kessel abgelassen (Variante a im vorherigen Abschnitt), liegt nach dem Abkühlen Unterdruck vor, da das Wasser zu seinem größten Teil auskondensiert und die Atmosphäre im Kessel durch das geschlossene System nicht wieder mit Luft angefüllt wird. Unter diesen Bedingungen entsteht ein Trocknungseffekt, der die dem Holz beim Aufheizen durch die Kondensation zugeführte Feuchte zum Teil wieder entzieht.

4.2.2 Einfluss auf die Holzeigenschaften

Über den Einfluss von Temperaturen über 100°C bei Überdruck auf die Holzeigenschaften sind bisher nur wenig Untersuchungen durchgeführt worden. Untersuchungen fanden vor allem in den 50 er und 60 er Jahren statt (Kollmann 1951, Kübler 1966). Bereits in früheren Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Wärmebehandlung von Holz physikalische und chemische Änderungen bewirkt. Dabei stand eine mögliche Verbesserung der Formstabilität und der Dauerhaftigkeit wie auch der Verarbeitbarkeit immer im Vordergrund der Forschungsarbeiten. Die im Laufe der Jahrzehnte gestiegenen Ansprüche an Holz führten dazu, daß begleitende Untersuchungen in dieser Richtung bis in die Gegenwart weiter durchgeführt werden (Haslett, et.al.1999, Sandland 1998, Kühl 1996, Milota 2000).

Gegenwärtig ist die Behandlung von Holz bei höheren Temperaturen unter holzschützerischen Gesichtspunkten wieder zum Thema geworden, da aufgrund des höheren Umweltbewusstseins auf eine chemische Behandlung des Holzes verzichtet werden soll. Aber auch die gerichtete Farbveränderung oder auch Farbhomogenisierung bei Temperaturen über 100°C wird von der Forschung aufgegriffen (Mitsu et.al. 2001), (Burtin et.al. 2000). Als neuere Anwendung ist z.B. Plato Holz bereits zum Begriff geworden (Euwid 2001), (Militz, Tjeerdesma 2001). Die Behandlung des Holzes mit diesem Verfahren hat als Zielsetzung vor allem die Nutzung von Nadelhölzern ohne chemischen Holzschutz für die Anwendung im Außenbereich.

Im Rahmen des Projektes soll gezeigt werden, wie sich die Druckdämpfung bei Temperaturen von über 100°C auf die Holzeigenschaften verschiedener Holzarten auswirkt. Im Focus der Untersuchungen steht hauptsächlich die Farbe. Dass bei der Druckdämpfung auch Verbesserungen anderer Holzeigenschaften, wie z.B. Sorptionsvergütung erreicht werden können,

wird als positiver Zusatzeffekt betrachtet.

Temperaturen von über 100°C führen zum Spannungsabbau im Holz (Diwanto et al.1999, Diwanto, Morooka, Norimoto 2000). Im Falle von bereits getrocknetem Schnittholz bewirkt das Feuchteangebot der Dämpfatmosphäre eine zusätzliche spannungsreduzierende Plastifizierung des Holzes. Durch Druckdämpfen lassen sich z.B. bei der Robinie und Buche auch vorhandene Wachstumsspannungen reduzieren.

Bei der Robinie kann aufgrund der reaktiven kondensierbaren Gerbstoffe im Holz durch eine Wärmebehandlung eine breite Farbpalette erzeugt werden, die im Gegensatz zur Farbe der unbehandelten Robinie diese Holzart insbesondere für dekorative Zwecke veredelt.

In die Versuchsplanung wurde Pappel als eine zusätzliche Holzart zum Druckdämpfen mit aufgenommen. Eine Inwertsetzung dieser heimischen, bisher wenig für höherwertige Anwendungen genutzte Holzart ist auch im Hinblick auf die Substitution von leichten Tropenhölzern wünschenswert. Auch von Seiten der Holzverarbeitung besteht großes Interesse an einer erhöhten Wertschöpfung aus Pappelholz. Das Holz ist in relativ großen Mengen verfügbar, erfordert aber spezielle verfahrenstechnische Behandlung für eine Eigenschaftsverbesserung, wie gleichmäßige Trocknung und Farbhomogenisierung. Über Wärmebehandlung in Druckdämpfanlagen liegen bisher keine speziellen Ergebnisse aus wissenschaftlicher Untersuchungen vor, so dass die Pappel als geeignetes Untersuchungsobjekt mit in die Projektbearbeitung aufgenommen wurde.

Als weitere Holzart wurde die Eiche druckgedämpft. Wie auch bei der Buche kommt es häufig zu ungewünschten, auf einzelne Bereiche der getrockneten Stücke begrenzte Farbabweichungen, wie z.B. unterhalb von Stapelleisten. Solche Farbunterschiede sind dann erst nach der Trocknung erkennbar, auch wenn sie bereits vor der Trocknung oder bei der Freiluftvortrocknung entstanden sind. Dies kann zu einer Entwertung von ansonsten fehlerfreiem Material wegen der Farbunterschiede führen. Durch die Druckdämpfung soll im Anschluss an die Trocknung eine Vergleichmäßigung der Farbe von solchen Stücken erreicht werden.

4.3 Trocknen von Holz

Beim Trocknen wird Schnittholz einem im Trockner zirkulierenden Wasserdampf-Luftgemisch oder einer reinen Wasserdampf Atmosphäre ausgesetzt, in der die in Form von Wasserdampf aus dem Holz austretende Feuchtigkeit aufgenommen und abtransportiert werden kann. Die Feuchteabgabe aus dem Holz erfolgt ausschließlich über die

Holzoberflächen. Hierbei entstehen unweigerlich Feuchtegradienten über den Brettquerschnitt, die zur Ausbildung von Trocknungsspannungen beitragen.

Bedingt durch das visko-elastische und plastische Verhalten des Holzes kommt es während der Trocknung zu einer Spannungsumkehr. Gegen Ende der Trocknung liegen im Holz normalerweise Zugspannungen im Brettinneren und Druckspannungen im Außenbereich vor, die durch eine entsprechend gestaltete Konditionierung abgebaut werden müssen. Hierzu muss die zuvor übertrocknete Brettoberfläche wiederbefeuchtet werden, was durch eine hohe relative Luftfeuchte (u_{gl}) des Trocknungsmediums bewirkt wird.

5 Vorbereitende Tätigkeiten im Projekt

5.1 Inbetriebnahme der Druckdämpfanlage

Die an der BFH vorhandene Druckdämpfanlage wurde für die bevorstehenden Versuchsreihen nach einer Umrüstung wieder in Betrieb genommen. Für die präzise Steuerung der Anlage wurde ein neuer programmierbarer Regler installiert. Die vorhandene Anlage war zuvor nur mit einem einfachen Zweipunktregler mit großer Regelhysterese ausgestattet.

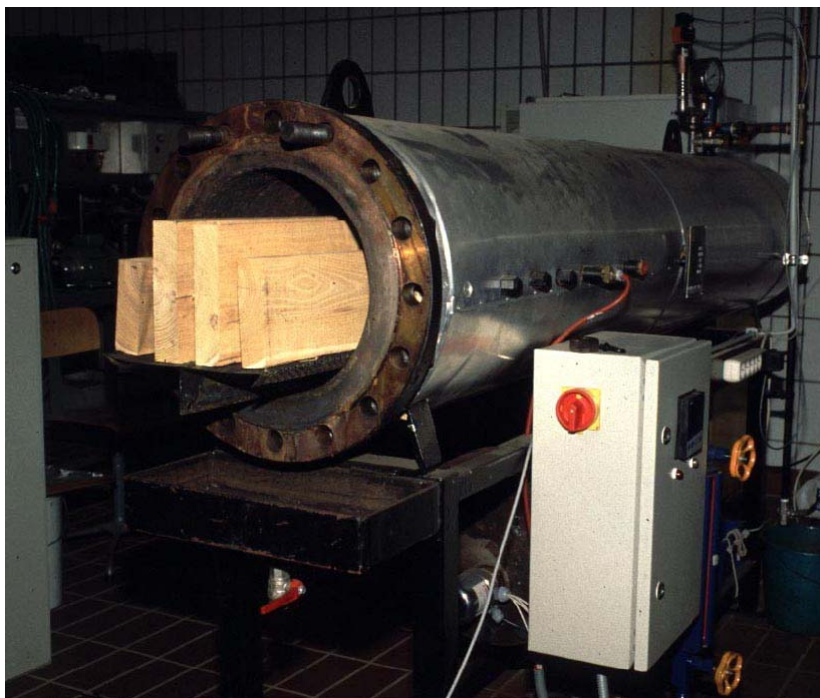


Bild 3 Druckdämpfanlage im Labormaßstab

Der Austausch war notwendig, da für vergleichende Untersuchungen verschiedener Prozessparameterkonstellationen eine genaue Einhaltung der Sollwertvorgaben zwingend erforderlich ist.

Durch die im Rahmen eines anderen Projektes durchgeführten Versuche war das Heizregister des Dampferzeugers derart in Mitleidenschaft gezogen worden, dass die Elektroheizstäbe durchbrannten. Das Heizregister musste komplett ausgetauscht werden. Zum Einsatz kamen diesmal Heizstäbe aus hochvergütetem, chemikalienresistentem Stahl, die den extrem korrosiven Bedingungen beim Druckdämpfen (hohe Temperatur, niedriger pH durch Anwesenheit von organischen Säuren) standhalten können.

Im Rahmen der Erprobung der Druckdämpfanlage wurden verschiedene

Versuche mit Robinienholz durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden z.T. die gleichen Versuchsbedingungen gewählt wie in den begrenzten Vorversuchen vor Projektbeginn. Diese orientierenden Vorversuche hatten als Grundlage für die Erstellung des dem Forschungsantrag zugrunde liegenden Versuchsplans gedient.

Mit dem alten, bisher eingesetzten Handdrehregler war aufgrund der großen Hysterese ($> \pm 10^\circ\text{C}$) kein genaues Halten der vorgewählten Temperatur-Sollwerte möglich. Durch das verbesserte Verhalten des neuen Reglers konnte eine sehr feinfühligere Temperaturreglung im Dampferzeuger erreicht werden, so dass nur noch eine geringe Temperaturschwankung von ca. $\pm 0,5^\circ\text{C}$ während der Dämpfphase auftrat.

Ein Verbesserung wurde auch hinsichtlich des Einschwingverhaltens des Systems erreicht. Bei der Verwendung des alten Reglers schwang die Temperatur in der Aufheizphase um bis zu 15°C über den eingestellten Sollwert hinaus. Mit dem neuen Regler konnte das Überschwingen auf ein Minimum reduziert werden.

Bei dem neuen Regler handelt es sich um einen Programmregler, was zur Folge hat, dass der Dämpfprozess nicht mehr ständig überwacht werden muss. Nach dem Erreichen der Solltemperatur kann nunmehr die gewünschte Temperatur für eine bestimmte Zeit gehalten werden. Nach Ablauf der Dämpfzeit wird die Heizung automatisch abgeschaltet und der Abkühlprozess eingeleitet.

Neben der verbesserten Bedienerfreundlichkeit ergeben sich hierdurch Vorteile insbesondere bei farblich schnell reagierenden Holzarten. Nicht so schnell reagierende Hölzer, wie z.B. Pappel und Buche, benötigen längere Dämpfzeiten und können mit Hilfe des Programmreglers über einen längeren Zeitraum unter definierten Bedingungen gedämpft werden.

An der Dämpfanlage wurde ein an der BFH vorhandenes PC- Datalogging-system installiert, an das die Messinstrumente der Druckdämpfanlage angeschlossen wurden (Temperatur- und Drucktransmitter). Die Geräte wurden kalibriert und das Gesamtsystem wurde einem umfangreichen Test unterzogen. Die Druck und Temperaturverläufe beim Druckdämpfen können nunmehr kontinuierlich aufgezeichnet werden.

5.2 Aufbau und Konfiguration eines neuen Farbmesssystems

Mit Hilfe des Auges ist es einem Beobachter möglich, Farben und Helligkeit differenziert zu unterscheiden. In der Praxis ist diese einfache Methode immer dann angebracht, wenn als Bewertungsmaßstab das Empfinden eines Betrachters ausreichend ist. Bei wissenschaftlichen Versuchen, die auf einen

Vergleich verschiedener Farben abzielen, ist jedoch eine einheitliche Definition von Farben notwendig. Subjektives Empfinden eines einzelnen Beobachters sowie verschiedenartige Beleuchtungen des Prüfkörpers sollten das Ergebnis der Farbmessung nicht beeinflussen.

Die Farbmessungen wurden nach dem $L^*a^*b^*$ -Farbsystem durchgeführt (DIN 5033, 1980). Dabei handelt es sich um eines der Farbmeßsysteme zur Vereinheitlichung der Farbmessung. Die einzelnen Farb- und Helligkeitswerte werden in ihre Bestandteile zerlegt und zahlenmäßig dargestellt. Die Koordinate L^* bezeichnet die Helligkeit der zu messenden Oberfläche. Mit a^* wird der rot/grün- Anteil beschrieben, während b^* den blau/gelb- Anteil der Farbe angibt.

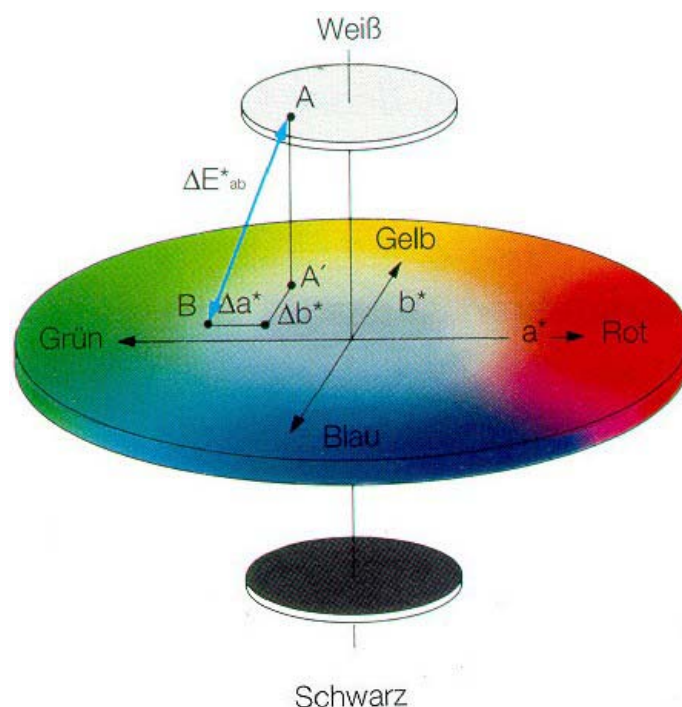


Bild 4 Darstellung des $L^* a^* b^*$ - Farbsystems (Minolta 1997)

Für eine verbesserte Farbmessung im Rahmen der geplanten Versuche wurde ein neues Farbmessgerät mit vergrößertem Messaufnehmer (Durchmesser des Messpunktes alt 8 mm, neu 50 mm) angeschafft. Insbesondere bei ringporigen Hölzern mit starken Farbunterschieden über den Jahrringverlauf und teilweise sehr breiten Jahrringen, wie z.B. bei der Robinie, erhöht eine zu kleine Messfläche die Streuungen der Farbwerte aufgrund von Fehlmessungen in zu hellen oder zu dunklen Bereichen. Ein zu kleiner Messaufnehmer verfälscht somit das Messergebnis und gibt dann möglicherweise bei genügend Messungen noch die mittlere Helligkeit des

gedämpften Brettes aus, lässt aber aufgrund des zufälligen Messfehlers auf einer nicht repräsentativen Fläche keine Interpretation der Streuungsreduzierung beim Farbgleich im Rahmen der Dämpfung zu. Für die Beschreibung der Farbe des Holzes ist aber entscheidend, dass gerade der Farbeindruck (Helligkeit und Farbwertanteile) auf einer größeren Fläche objektiv mit dem Farbmeßsystem beschrieben werden kann. Dies ist insbesondere wichtig, wenn z.B. bei einem Parkettboden mit grösserer Fläche aus den Einzellamellen ein gleichmäßiger Farbeindruck entstehen soll.

Für die Messungen wurde das Gerät „Chroma-Meter CR 310“ der Firma Minolta verwendet. Bild 5, Aufbau des Farbmesskopfes (Minolta 1997), verdeutlicht den Aufbau des Farbmesskopfes. Bei der Messung wird von einer Xenon-Blitzlampe ein definierter Lichtblitz gegen die Probe ausgesendet. Das von der Probe reflektierte Licht wird anschließend analysiert. Es enthält alle Farb- und Helligkeitsinformationen. Die Messfläche ist gegen fremdes Licht aus der Umgebung abgeschirmt. Sie hat einen Durchmesser von 50 mm. Somit werden durch die Struktur der Holzoberfläche bedingte Farbunterschiede in die Mittelwertbildung einbezogen. Vor jeder Messreihe wurde das Messgerät gegen den Weißstandard kalibriert.

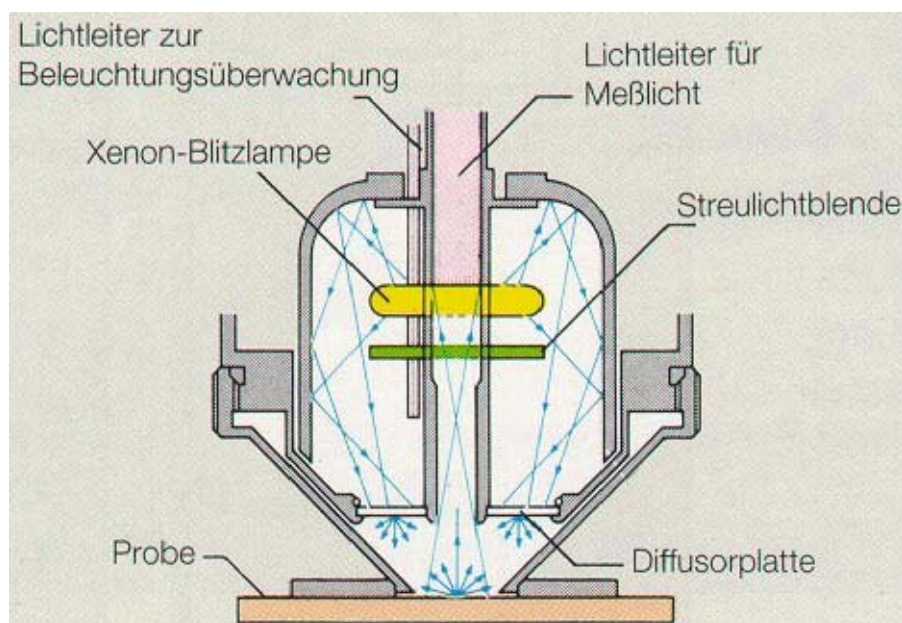


Bild 5 Aufbau des Farbmesskopfes (Minolta 1997)

Für die Farbauswertung stand neue Software zur Verfügung, wodurch die Farbermittlung bei größeren Serien stark erleichtert wird, da im Programm

bereits die statistische Aufbereitung der gemessenen Werte voreinstellbar ist. Die Messwerte können gespeichert oder direkt auf dem angeschlossenen PC zur Weiterverarbeitung und Analyse ausgelesen werden.

6 Materialbeschaffung und Aufbereitung

6.1 Robinie

Für die erste Versuchsreihe mit der Robinie musste aufgrund von unwitterbedingten Lieferengpässen beim ursprünglich avisierten Lieferanten in Ungarn Robinienrundholz in einem Brandenburger Forstamt beschafft werden. Der Einschnitt des Rundholzes an der FH Eberswalde wurde in der 8. Woche im Jahr 2001 durchgeführt. Insgesamt standen 20 FM Rundholz zur Verfügung. Das an der BFH angelieferte Material wurde in zwei Kollektive aufgeteilt, von denen eines vor der Druckdämpfung im F/A Labortrockner der BFH technisch getrocknet wurde. Der zweite Teil des Materials wurde im frischen Zustand gedämpft. Die technische Trocknung erfolgt entsprechend der gängigen Praxis in der Industrie in den institutseigenen Versuchstrocknern, um sicherzustellen, dass die Trocknungsvorgeschichte in die Untersuchungen einfließen kann.

Das als Blockware angelieferte Material wurde vor der Weiterverarbeitung sortiert, so dass z.B. Bohlen mit der häufig bei der Robinie auftretenden Kernfäule für die Eigenschaftsuntersuchungen ausgeschlossen wurden. Die 35 mm dicke und 2400 mm lange Blockware wurde zu 1200 mm langen und 150 mm breiten Brettern aufgeschnitten. Die Länge wurde durch die Abmessungen des Vakuumlabortrockners für die vorherige Trocknung eines Teils der Charge begrenzt. Für den Druckdämpfkessel ist eine maximale Länge der Bretter von 2000 mm möglich. Durch das nachträgliche Kürzen der Bretter auf 1000 mm konnte getrocknetes und ungetrocknetes Material in einem Durchgang unter gleichen Bedingungen gedämpft werden

6.2 Pappel

Für die Versuche mit Pappel wurden von einem Sägewerk 8 m³ frisch eingeschnittenes Pappelholz zur Verfügung gestellt. Die Abmessungen der Bretter betragen 40X100-200X2000mm³. Aus dem Material wurden 3 Gruppen gebildet. Ein Teil des Materials wurde im F/A Labortrockner technisch getrocknet und danach druckgedämpft. Ein weiterer Teil wurde im Labortrockner im Hochtemperaturbereich getrocknet. Die restliche Partie wurde zuerst gedämpft und anschließend getrocknet.

6.3 Buche und Eiche

Bei den Versuchsreihen zur Farbhomogenisierung bei ungleichmäßig verfärbten Buchen- und fleckigem Eichenholz stand getrocknetes Schnittholz von verschiedenen Laubholzsägewerken zur Verfügung. Anzahl und Abmessungen werden in den Kapiteln der Untersuchungen aufgeführt.

6.4 Eigenschaftsuntersuchungen nach dem Druckdämpfen

In einer Vielzahl von Versuchsreihen mit unterschiedlichen Prozessparametern sollen neben Buchen- und Robinienholz auch weitere Holzarten druckgedämpft werden. Als Referenzmaterial dient - je nach untersuchter Holzeigenschaft, ungedämpftes bzw. konventionell gedämpftes Material. Die Druckdämpfversuche werden sowohl mit frisch eingeschnittenem als auch mit getrocknetem Material durchgeführt.

Im Rahmen der Versuche zur Optimierung der Druckdämpfung müssen die Dämpfparameter Temperatur und Zeit variiert werden. Hierbei entsteht eine beträchtliche Menge an Probekleinern, an denen die komplette Palette von Eigenschaftsuntersuchungen durchgeführt werden muss.

Nach dem folgenden Schnittmuster wurden die Bereiche des Holzes für die verschiedenen Eigenschaftsprüfungen angefertigt (Bild 6).

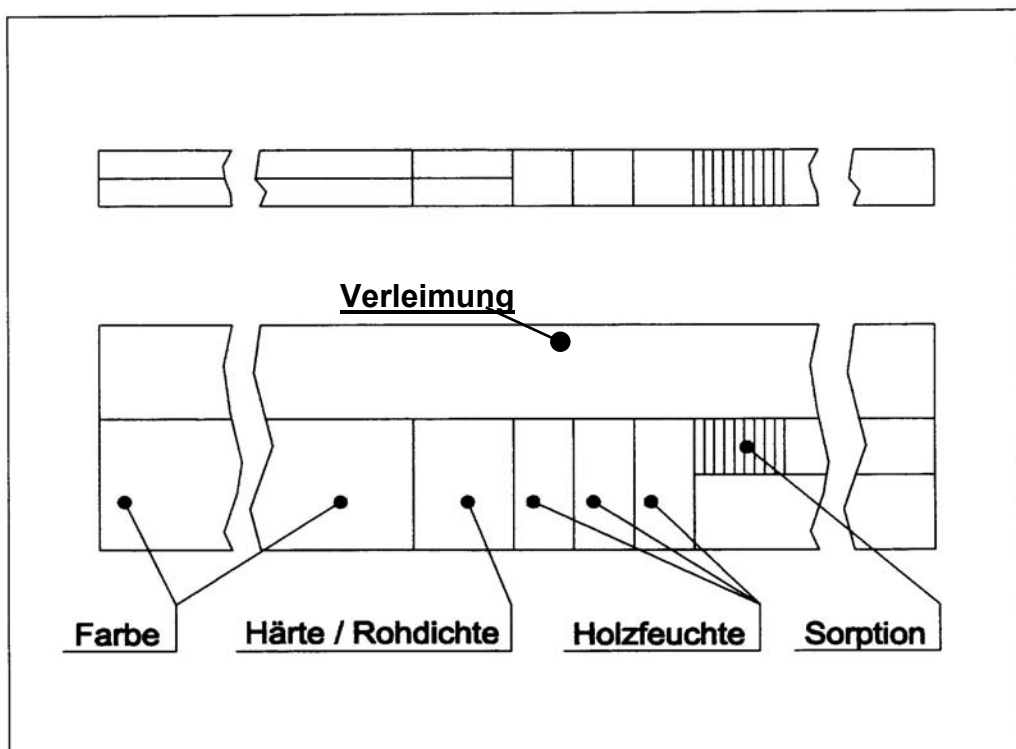


Bild 6 Einschnittmuster für die vergleichenden Eigenschaftsuntersuchungen für Robinie

Das druckgedämpfte Probenmaterial sowie das Referenzmaterial wurde nach dem standardisierten Muster zu Proben aufgeschnitten, und danach die vergleichenden Eigenschaftsuntersuchungen durchgeführt. Bei Holzarten, bei denen die erforderlichen Abmessungen für das Einschnittmodell nicht vorlagen, oder bei denen sich die Untersuchung nur auf einer Auswahl der Eigenschaften wie z.B. Holzfeuchte und Farbe beschränkte, wurde die Probenauswahl entsprechend angepasst.

6.5 Bestimmung der Trocknungsqualität

Die Gleichmäßigkeit der Holzfeuchte und die Verschalung sind wichtige Qualitätsmerkmale für die spätere Verarbeitung zu hochwertigen Produkten. Im Rahmen der Bestimmung der Trocknungsqualität werden in Anlehnung an die EDG- Richtlinie Trocknungsqualität und die aktuellen Entwürfe von CEN Normen zur Bestimmung der Trocknungsqualität die folgenden Merkmale ermittelt:

6.5.1 Bestimmung der mittleren Holzfeuchte für jedes Versuchsbrett

Nach den Bestimmungen der pr EN 13183 Teil 1 wurden von jedem Versuchsbrett vor und nach der Dämpfung ein Darrriegel von 20 mm entnommen.

Die Riegel wurden bei 103°C 48 Stunden im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Bestimmung der Holzfeuchte wurde nach folgender Formel durchgeführt.

$$u[\%] = \frac{m_{nass} - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100$$

u = Holzfeuchte in Prozent

m_{nass} = Gewicht feucht

m_{tr} = Gewicht trocken

6.5.2 Bestimmung der durchschnittlichen Holzfeuchte jeder Trocknungs- und Dämpfcharge

Die durchschnittliche Holzfeuchte einer Charge wurde durch Mittelung der Einzelwerte vorgenommen. Zur Beschreibung der Streuung wird die

Standardabweichung der Kollektive in den einzelnen Behandlungsstufen ermittelt.

6.5.3 Grad der Verschalung (Mittenschnitt-Test)

Der Grad der Verschalung wurde nach der Methode des Mittenschnitttests entsprechend der pr EN 14464, Mai 2002, durchgeführt. Dabei wurde von jedem Brett ein Querriegel von 20 mm entnommen und in der Mitte aufgespalten. bzw. aufgesägt. Die Proben wurden 48 Stunden klimatisiert gelagert und die gebildete Spaltöffnung mittels einer Schieblehre gemessen.

6.6 Bestimmung der Holzfarbe

Zur objektiven Bestimmung der Holzfarbe wird das vorhandene Farbmessgerät (Chroma-Meter CR-310) der Fa. Minolta verwendet. Die Proben für die Farbprüfung werden beidseitig gehobelt und oberflächenparallel mittig aufgetrennt. Auf jeder Fläche wird die Farbe an mehreren Punkten (mindestens 5) bestimmt.

Die ermittelten Farbwerte (CIE- L^*a^*b -Farbsystem) dienen zur Charakterisierung des bei jeder Dämpfparameterkombination erzielten Farbtones, die Streuung der Einzelwerte gibt Aufschluss über die Homogenität der Farbe.

6.7 Dimensionsstabilität, Sorptionsvergütung

Zur Ermittlung der Schwind- und Quelleigenschaften sowie der Sorptionseigenschaften werden aus jedem Versuchsbrett eine Vielzahl von hintereinanderliegenden kleinen Probenkörper 20x20 mm² mit geringen Abmessungen in Längsrichtung (10 mm) erzeugt. Diese Probenkörper werden in speziellen Sorptionswannen bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert. Aus den Abmessungsänderungen wird das Schwind- und Quellverhalten ermittelt, aus den sich in den verschiedenen Klimastufen einstellenden Holzfeuchten wird die Sorptionsisotherme abgeleitet, die Aufschluss über die erzielte Sorptionsvergütung erlaubt.

6.8 Härte

Für die Verwendung von Holz zur Parkettherstellung ist die Härte eine wichtige Kenngröße. Zu diesem Zweck wird die Brinell-Härte quer zur Faserrichtung ermittelt.

6.9 Verleimbarkeit

Für jede Versuchsvariante werden Probenkörper für die Verleimungsprüfung erzeugt. Die Verleimung wird nach Abstimmung mit der projektbegleitenden

Arbeitsgruppe mit handelsüblichen Leimen, die in der Parkett und Fensterindustrie zur Anwendung kommen, durchgeführt. Die Proben werden nach der Verleimung zur Überprüfung der Verleimungsfestigkeit der Druckscherfestigkeitsprüfung und der Querkzugprüfung unterzogen.

7 Ergebnisse

7.1 Vorversuche mit Robinie

Im Rahmen von Vorversuchen waren an der BFH eine Reihe von Dämpfversuchen mit Robinie durchgeführt worden, mit der Zielsetzung, die natürliche gelb-grüne Farbe des frischen und technisch getrockneten Robinienholzes gezielt zu beeinflussen. Bei diesen Versuchen zeigte sich, dass durch den Druckdampfprozess die Farbe des Robinienholzes je nach Temperatur und Dämpfzeit zwischen hellbraun und dunkelbraun variiert werden kann.

Im Rahmen der Wiederinbetriebnahme der Druckdämpfanlage und der Überprüfung des Regelverhaltens mit neuem Regler wurden bisher zwei der zuvor bereits verwendeten Dämpfbedingungen wiederholt. Bei den Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass bei Robinie kein Farbunterschied zwischen im frischen und getrockneten Zustand gedämpften Material besteht. Helligkeit und Farbwertanteile zeigen für trocknes ($u \sim 10\%$) oder feuchteres ($u \sim 30\%$) Material keinen signifikanten Unterschied. Für die Farbänderung ist die Feuchte der Robinie demnach nachrangig zu beurteilen. Entscheidend ist die Temperatureinwirkung auf das Material und deren Dauer.

7.1.1 Erste Ergebnisse der Robiniendämpfung

Der Versuchsplan für die Untersuchung des Einflusses der Parameter beim Druckdämpfen sieht vor, dass eine breite Palette von Bedingungen getestet wird. Als Vergleichsmaterial dient jeweils ungedämpftes Robinienholz.

In Bild 7 ist links ein ungedämpftes Muster, in der Mitte ein bei 120°C für 4 Stunden und rechts ein bei 140°C für 2 Stunden gedämpftes Muster dargestellt. 140°C stellt wahrscheinlich bei Robinie eine Obergrenze für die Dämpftemperatur dar, da bei dieser Temperatur bereits Risse auftraten. Eine zusätzliche Veränderung der Farbe kann jedoch auch durch unterschiedlich lange Haltezeiten erreicht werden.

Bei der Robinie wird mit 140°C das Maximum an möglicher Dämpftemperatur erreicht, da oberhalb dieser Temperatur das Risiko für Risse erhöht ist.

Im Rahmen der Hauptversuche soll festgestellt werden, bei welchen Bedingungen welcher Farbton in möglichst kurzen Zeiträumen bei möglichst geringem Risiko für das Holz erreicht werden kann.



Bild 7 Erreichbare Farbpalette bei Robinienholz
(von links nach rechts: ungedämpft, 120°C/4h, 140°C/2h)

7.2 Hauptversuche mit Robinie

7.2.1 Dämpfbedingungen

Aufgrund der in den Vorversuchen ermittelten Obergrenze der Temperatur bei 140° wurden die weiteren Versuchsreihen mit folgenden Dämpftemperaturen durchgeführt.

	<i>Temperatur [t]</i>					
Zeit [h]	85°	95°	110°	120°	130°	140°
2				X	X	X
4			X	X	X	X
10			X	X	X	
48	X	X				
72		X				

Tab. 1 Dämpfparameter Robinie

Die Temperaturstufen 85 und 95° entsprechen den Dämpftemperaturen unter Atmosphärendruck und werden zum Vergleich mit den Ergebnissen des

Druckdämpfens herangezogen. Die Temperaturstufen von 110 bis 140° Celsius werden als mögliche Arbeitstemperaturen für das Druckdämpfen gewählt und sollen über das Dämpfergebnis in Bezug auf Farbe und Eigenschaftsveränderung des Holzes untersucht werden.

7.2.2 Untersuchungen der Farbe

Mit zunehmender Temperatur bei gleicher Haltezeit lässt sich eine intensivere Färbung des Holzes erreichen (Bild 8). Jedoch wurde bei 140 °C für frische Robinie die Obergrenze der Temperatur erreicht. Die nicht vorgetrockneten Proben zeigen in diesem Bereich bereits teilweise Innenrisse, durch deren Auftreten das Holz entwertet wird. Bei technisch vorgetrocknetem Holz traten derartige Schäden nicht auf. Innerhalb des gewählten Temperaturbereiches wurde untersucht, ob ähnliche dunkle Farbabstufungen durch Änderung des Dämpfparameters Haltezeit möglich sind, um somit Schädigungen des Materials zu vermeiden.

Auch die Verlängerung der Haltezeit führt zu einer intensiveren Färbung des Holzes (Bild 9). Auffällig ist, dass im Bereich höherer Temperaturen eine längere Haltezeit nicht mehr eine so deutliche Farbänderung hervorruft (Bild 10).

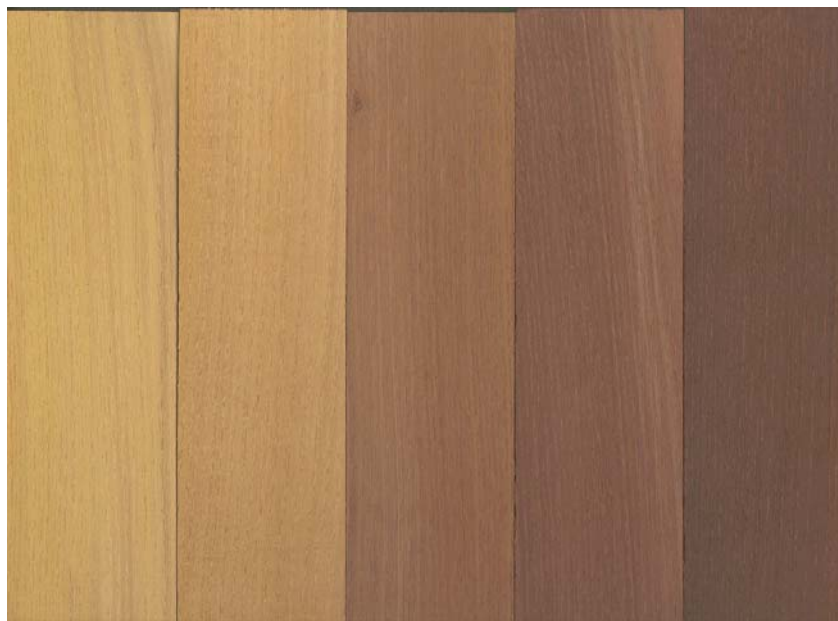


Bild 8 Farbvergleich; von links nach rechts: ungedämpfte Robinie, druckgedämpfte Robinie mit 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C bei jeweils 4 h Haltezeit.



Bild 9 Von links nach rechts: ungedämpfte Robinie, druckgedämpfte Robinie mit 2, 4 und 10 h Haltezeit bei jeweils 120 °C.

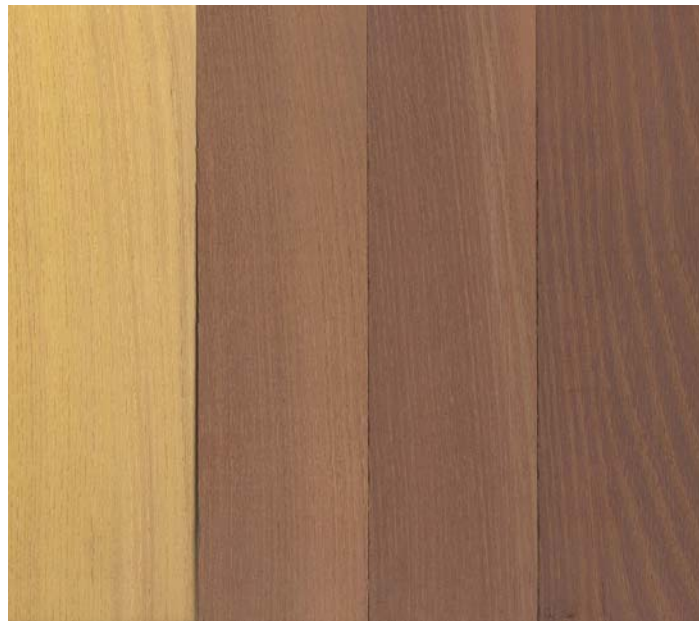


Bild 10 Von links nach rechts: ungedämpfte Robinie, druckgedämpfte Robinie mit 2, 4 und 10 h Haltezeit bei jeweils 130 °C.

Begünstigt die Erhöhung der Temperatur ebenso wie die Verlängerung der Haltezeit eine stärkere Farbveränderung, so bedeutet dies, dass die größtmögliche Verfärbung theoretisch mit maximaler Temperatur bei maximaler Haltezeit (Bsp. 140 °C, 10 h) zu erreichen wäre. Praktisch ist dies nicht zu verwirklichen, da derart extreme Dämpfbedingungen bereits zur Zerstörung des Holzes führen können. Vielmehr sollte mit Zunahme der

Dämpftemperatur die Haltezeit verringert werden. Lässt sich mit höherer Temperatur und kürzerer Haltezeit die gleiche oder eine intensivere Holzfarbe im Vergleich zum konventionellen Dämpfen erzielen, so weist dies trotzdem auf einen weiteren Vorteil des Druckdämpfens hin. Die Anwendung des Verfahrens geht mit einer Zeiteinsparung einher. Zur Überprüfung der Farbunterschiede wurden die Farbmessergebnisse verschiedener Versuche miteinander verglichen.

Vorgetrocknetes Robinienholz ist im Bereich hoher Temperaturen besser zur Vergütung durch Druckdämpfen geeignet als frisch eingeschnittenes.

Für die unterschiedlichen Dämpfparameter (Temperatur, Haltezeit) wurden für ausgesuchte Versuchsreihen die Helligkeit der Oberflächen sowie die Farbwertanteile (rot-grün, blau-gelb) miteinander verglichen. Es sollte die Frage beantwortet werden, ob sich die gleichen Farbkombinationen bei niedrigeren Temperaturen in Kombination mit verlängerter Haltezeit erreichen lassen. Im zweiten Teil des Vergleichs sollte gezeigt werden, ob sich bei geringeren Dämpftemperaturen mit längeren Haltezeiten die gleichen Streuungen der Farbe zwischen den Brettern ergeben, da die Gleichmäßigkeit der Farbe unter den Brettern gewährleistet sein muss. Die folgenden Tabellen zeigen die Messwerte für die Helligkeit und jeweils den Farbwertanteil in den Dämpfstufen. Zum Vergleich sind die Farbwerte für ungedämpfte Robinie (Ref.) mit aufgeführt.

L^*		Temperatur [t]					
Zeit [h]	Ref.	85°	95°	110°	120°	130°	140°
0	71,5						
2					59,1	47,1	43,8
4				63,1	48,3	42,0	41,0
10				52,7	44,1	41,9	
48		66,4	49,9				
72			44,9				

Tab. 2 Helligkeitswerte L^* bei unterschiedlichen Dämpfparametern bei vorher getrockneter Robinie

a^*		Temperatur [t]					
Zeit [h]	Ref.	85°	95°	110°	120°	130°	140°
0	3,7						
2					7,9	9,3	8,7
4				7,22	9,3	8,5	8,2
10				9,16	9,0	8,5	
48		6,3	10,3				
72			9,4				

Tab. 3 Rot-grün Anteile a^* bei unterschiedlichen Dämpfparametern bei vorher getrockneter Robinie

b^*		<i>Temperatur [t]</i>					
Zeit [h]	Ref.	85°	95°	110°	120°	130°	140°
0	28,2						
2					22,8	13,6	12,3
4				23,8	14,6	10,8	11,7
10				18,9	11,8	12,1	
48		26,1	16,5				
72			13,3				

Tab. 4 Gelb-blau Anteile b^* bei unterschiedlichen Dämpfparametern bei vorher getrockneter Robinie

Vergleich der Dämpfungen 110°4h und 120°2h mit der Referenz

Die Dämpfstufe 110° stellt die untere Grenze des gewählten Temperaturbereichs unter Überdruck dar. Bei dieser Temperatur wird hauptsächlich die Reduzierung der ungewünschten gelb/grünen Farbe des ungedämpften Robinienholzes erreicht, während die Helligkeit des Holzes in geringerem Maße abnimmt (Bild 8). Beim gedämpften Holz ist die Verringerung des Grünanteils (a^* Wert) im Vergleich zur Referenz größer als die Verringerung der Farbe um den mehr helligkeitsgebenden Gelbanteil (b^* Wert). Farbwerte in der gleichen Größenordnung wurden bei der Dämpfung unter 120° mit 2 Stunden Haltezeit erreicht. Die Erhöhung der Temperatur um 10° bewirkt jedoch auch bei der geringeren Haltezeit weniger Helligkeit gegenüber der Dämpfung bei 110°.

Vergleich der Dämpfungen 110°10h und 95°48h

Bei beiden Versuchen wurden Ergebnisse in der gleichen Größenordnung ermittelt. Helligkeit und Farbanteile lassen sich auch bei einer visuellen Bewertung nicht unterscheiden. Das gleiche Dämpfergebnis ist beim Druckdämpfen mit 110° in 20% der Zeit im Vergleich zu 95° Dämpftemperatur erreicht worden.

Vergleich der Dämpfung 95°72h mit 140°2h

Bei beiden Versuchen ist bezüglich der Farbe ein fast identisches Dämpfergebnis erzielt worden. Die Helligkeit der Bretter hat in der

gleichen Größenordnung abgenommen. Die Verminderung des Gelbanteils und die Zunahme des Rotanteils sind bei beiden Serien mit einer visuellen Beurteilung nicht voneinander zu unterscheiden. Beim Zeitaufwand für diese beiden Serien ergibt sich für das Druckdämpfen bei gleichem Resultat ein erheblicher Zeitvorteil gegenüber dem Dämpfen unter Atmosphärendruck. Nur ca. 2% der Dämpfzeit sind in diesem Fall beim Druckdämpfen erforderlich.

Vergleich der Temperaturstufen 130 und 140°

Beide Temperaturstufen zeigen für unterschiedlich lange Haltezeiten ähnliche Farbwerte. Lediglich bei 2 Stunden Haltezeit weisen die Probek Bretter noch erkennbare Unterschiede in der Helligkeit auf. Der dunkle Farbton bei 140° mit 2 Stunden Dämpfzeit ist auch mit 130° durch 4 Stunden Dämpfen erreichbar.

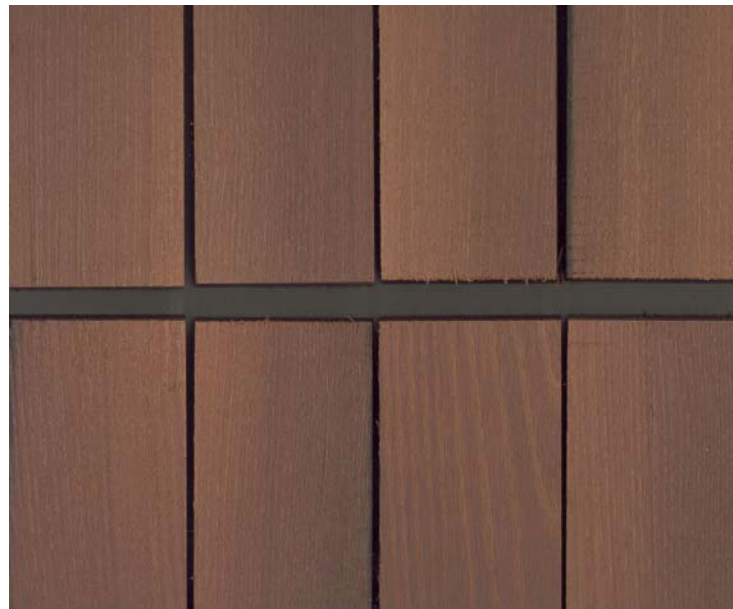


Bild 11 Farbvergleich: unten Versuch mit 130 °10 h, oben Versuch mit 140 °C 2h bei vorher getrockneter Robinie

Eine dunklere Farbe ist bereits bei 130° durch 10 Stunden Dämpfzeit nicht mehr möglich (Bild 11). In 10 Stunden Dämpfen bei 130° wird ein Maximum der Farbänderung bei Robinie erreicht. Beim Dämpfen unter 100° C sind bis zu diesem Punkt bei 98°C 8 Tage erforderlich (Tolvaj, Horvarh, Safar 2000).

Wegen der Gefahr, dass das Material bei 140° bereits teilweise geschädigt werden kann, empfiehlt es sich, die Robinie nicht mit mehr als 130° zu dämpfen.

Farbunterschiede bei getrocknetem und ungetrocknetem Material

Parallel wurde in jeder Dämpfcharge vorgetrocknetes Material mit frischem Material gedämpft. Es sollte untersucht werden, ob bei der Druckdämpfung des Holzes, die unterschiedliche Holzfeuchte einen Einfluss auf die erreichte Farbe hat. Die Messwerte $L^*a^*b^*$ des frischen Materials wurden mittels t-Test mit denen der gedämpften und getrockneten Robinie verglichen. Signifikante Unterschiede konnten dabei nur für die Helligkeit bei einer Dämpfung ermittelt werden. Lediglich bei der Dämpfung mit 95° bei 72 Stunden wurde ein Unterschied in der Helligkeit zugunsten einer dunkleren Holzfarbe bei frischem Material gemessen. In den folgenden Tabellen werden die Differenzen angegeben.

ΔL^*		<i>Temperatur [t]</i>					
Zeit [h]	Ref.	85°	95°	110°	120°	130°	140°
0							
2					0,6	0,9	1,9
4				1,5	1,7	0,6	2,0
10				0,7	0,6	0,8	
48		2,0	2,7				
72			7,2				

Tab. 5 Farbunterschiede frische/getrocknete Robinie, L^* Werte

Δa^*		<i>Temperatur [t]</i>					
Zeit [h]	Ref.	85°	95°	110°	120°	130°	140°
0							
2					0,0	0,7	0,4
4				0,6	0,4	0,0	0,0
10				0,1	0,5	0,3	
48		0,2	0,7				
72			0,2				
Δb^*		<i>Temperatur [t]</i>					
Zeit [h]	Ref.	85°	95°	110°	120°	130°	140°
0							
2					0,9	0,7	1,0
4				2,7	0,2	0,5	1,6
10				1,6	0,1	0,6	
48		1,6	3,1				
72			3,7				

Tab. 6 Farbunterschiede frische/getrocknete Robinie, a^* , b^* Werte

7.2.3 Holzfeuchte

Die Proben des frischen Robinienholzes haben vor den Druckdämpfversuchen eine durchschnittliche Holzfeuchte von 33%. Das Dämpfen geht im Falle des frischen Holzes erwartungsgemäß mit einem Trocknungsprozess einher. Die Holzfeuchte nach den Dämpfversuchen war sehr unterschiedlich und lag im Bereich von 21 % bis 32 %. Ein Zusammenhang zwischen Abnahme der Holzfeuchte und Dämpftemperatur bzw. Haltezeit konnte anhand der ermittelten Holzfeuchten nicht

festgestellt werden. Im Vergleich zur üblichen technischen Trocknung ergaben sich in Anbetracht der relativ kurzen Haltezeiten teilweise recht beachtliche Trocknungseffekte. Jedoch ist die Holzfeuchte über den Querschnitt sehr ungleichmäßig verteilt. In den äußeren Schichten verringerte sie sich durch das Druckdämpfen um etwa 10 bis 15 %, während sie in den inneren Schichten gar nicht oder nur um bis zu 5 % abnahm. Diese Feuchtigkeitsunterschiede verursachen Spannungen im Holz und führten im Vergleich zu den Versuchen mit technisch vorgetrocknetem Holz zu deutlich schlechteren Qualitäten, da bei der Robinie teilweise Risse auftraten.

Die Verwendung von frischem Robinienholz für das Druckdämpfverfahren ist nicht zu empfehlen.

Holzfeuchte [u] (%)	Getrocknet vor dem Dämpfen		Frisch gedämpft	
	vor	nach	vor	nach
95°_48h	7,7	17,1	33,0	25,5
95°_72h	8,8	17,8	38,3	28,6
110°_4h	9,8	12,1	34,6	32,8
110°_10h	8,5	14,1	35,7	20,8
120°_2h	9,3	11,6	32,2	22,0
120°_4h	8,9	12,6	30,0	23,7
120°_10h	10,2	11,3	33,2	21,7
130°_2h	8,9	9,9	34,1	28,2
130°_4h	8,9	10,7	29,9	27,4
130°_10h	10,2	12,8	32,3	27,4
140°_2h	11,3	12,9	33,5	26,9
140°_4h	11,3	13,2	29,0	25,3

Tab. 7 Holzfeuchten vor und nach der Dämpfung bei Robinie

Bei technisch vorgetrocknetem Holz kam es infolge des Dämpfens erwartungsgemäß zu einer leichten Zunahme der Holzfeuchte. Die durchschnittliche Holzfeuchte lag vor den Dämpfversuchen bei 9,5 %. Die langen Haltezeiten bei Dämpftemperaturen unter 100 °C (konventionelles Dämpfen) führen zu einer höheren Feuchteaufnahme des Holzes als beim Druckdämpfen. Bei den Versuchen mit 95° (Tab. 7) ist eine Zunahme der Holzfeuchte um 9,0 % bzw. 9,5 % zu verzeichnen. Mit zunehmender Dämpftemperatur und Verringerung der Haltezeit nimmt das Holz bedeutend weniger Feuchtigkeit auf. So erhöht sich die Holzfeuchte infolge der Druckdämpfversuche mit 130 und 140° nur noch um 1 bis 2 %. Im Möbel- und Innenausbau sind Holzfeuchten von 8 % bis 10 % üblich (zentralgeheizte Räume). Für Parkett wird eine Holzfeuchte von 9 % eingestellt.

Bei der technischen Trocknung von Holz, welches für eine anschließende Druckdämpfung vorgesehen ist, müssen entsprechend geringere Holzfeuchten vorgesehen werden.

Die Feuchteverteilung über den Querschnitt bei druckgedämpftem Holz ist gleichmäßig. Bei kürzeren Haltezeiten (2 h, 4 h) ergeben sich zwischen den äußeren und den inneren Schichten Unterschiede bis zu 1 %.

7.2.4 Verschalung

Die Druckdämpfversuche mit frischem Robinienholz führten zu teilweise erheblicher, die Qualität des Holzes stark beeinträchtigender Verschalung. Der bei hohen Temperaturen starke Trocknungseffekt bewirkt eine schnelle Verringerung der Holzfeuchte an der Oberfläche (Rosen 1982), auch wenn zunächst beim Aufheizen die Holzfeuchte durch die Kondensation des Dampfes auf dem Holz stattfindet. Beim Abkühlen der Anlage entsteht ein Unterdruck, so dass bei noch höheren Temperaturen die Oberfläche des Holzes trocknet. Die Schwindung der äußeren Bereiche wird dabei durch die noch sehr feuchten Innenbereiche verhindert. Die entstandenen Trocknungsspannungen führten besonders bei hohen Dämpftemperaturen zu Innenrissen. Der überwiegende Teil der Bohlen zeigte nach dem Dämpfen lange Risse in Faserrichtung. Einige Bohlen wiesen starke Krümmungen auf. Dies wird auf Wachstumsspannungen und Wuchsfehler zurückgeführt. Hinsichtlich der Farbe und einer effektiven Anwendung des Druckdämpfverfahrens sind hohe Temperaturen und kurze Haltezeiten gewünscht. Daher ist, entsprechend den Erfahrungen aus diesen Versuchen, das Druckdämpfen von frischem Robinienholz nicht empfehlenswert.

Verschalung [Spaltöffnung] (mm)	Getrocknetes Material vor und nach der Dämpfung	
	vor	nach
Dämpfstufe		
95°_48h	1,2	-0,9
95°_72h	1,3	-0,7
110°_4h	1,4	-0,8
110°_10h	1,1	-1,4
120°_2h	1,1	-0,4
120°_4h	1,0	-0,9
120°_10h	1,5	0,1
130°_2h	1,2	0,4
130°_4h	1,0	0,2
130°_10h	1,5	0,1
140°_2h	2,3	0,8
140°_4h	2,3	0,5

Tab. 8 Verschalung getrockneter Robinie vor und nach dem Dämpfen

Die Versuche mit technisch vorgetrocknetem Holz erbrachten in allen Fällen eine Verringerung der Verschalung infolge des Dämpfprozesses. Die Messergebnisse liegen für fast alle Proben im Bereich bis zu 1 mm Spaltöffnung. Damit erfüllen, hinsichtlich des Verschalungsgrades, nahezu alle Versuche die Kriterien für die Bewertung „E“ („exklusive“), zumindest jedoch „Q“ („qualitätsgetrocknet“), nach der EDG-Richtlinie „Trocknungsqualität“ (Nach der Mittenschnitt-Methode müssen 90 % aller Spaltöffnungen kleiner oder gleich 1 mm („E“) bzw. 2 mm („Q“) sein.). Durch die vorangegangene technische Trocknung lag die Verschalung bereits vor dem Dämpfen in den Bereichen „qualitätsgetrocknet“ oder „standard“ (max. 3 mm).



Bild 12 Verringerung der Verschalung durch Druckdämpfen bei technisch vorgetrocknetem Robinienholz; Anwendung der Mittenschnitt-Methode, links vor, rechts nach dem Druckdämpfversuch, Versuch (140 °C 2 h)

7.2.5 Sorptionsvergütung

Mit den Sorptionsversuchen wurden die Ausgleichsfeuchten des Robinienholzes bei unterschiedlichen rel. Luftfeuchten ermittelt. Es sollte untersucht werden, ob durch das Druckdämpfen ein Vergütungseffekt erzielt werden konnte.

Die Versuche wurden mit gedämpften Hölzern der Temperaturstufen 110, 120 und 130° mit jeweils 4 Stunden Haltezeit durchgeführt. Zum Vergleich wurden die Ausgleichsfeuchten für getrocknetes, ungedämpftes Robinienholz als Referenz mit ermittelt.

Die folgenden Tabellen zeigen die Ausgleichsfeuchten für eine Temperatur von 20° mit 35, 65 und 85% relativer Luftfeuchte.

Ausgleichsfeuchte [u] (%)	20°/35%	20°/65%	20°/85%
Ref.	6,5	10,3	15,2
110°_4h	6,5	10,3	14,7
120°_4h	5,8	10,1	14,7
130°_4h	6,0	9,9	14,1

Tab. 9 Ausgleichsfeuchten für Robinie, gedämpft nach dem Trocknen

Ausgleichsfeuchte [u] (%)	20°/35%	20°/65%	20°/85%
Ref.	6,5	10,3	15,2
110°_4h	6,4	10,4	14,4
120°_4h	6,0	10,1	14,1
130°_4h	5,5	9,4	13,6

Tab. 10 Ausgleichsfeuchten für Robinie, gedämpft vor dem Trocknen

Beim Dämpfen wird durch die Veränderung der Hygroskopizität des Holzes die Gleichgewichtsholzfeuchte verringert. Mit zunehmender Dämpf-temperatur verringert sich demnach die Ausgleichsfeuchte des Robinienholzes. Dieser Trend wurde bei allen untersuchten Klimastufen festgestellt. Beim Vergleich der Klimastufen mit 35, 65 und 85% rel. Luftfeuchte untereinander zeigt sich, dass die Sorptionsvergütung für höhere Luftfeuchte in stärkerem Masse stattgefunden hat.

Bei druckgedämpftem Holz lässt sich ein geringer Sorptionsvergütungseffekt feststellen.

Für getrocknete und nachträglich gedämpfte Robinie ist der Vergütungseffekt geringer ausgefallen als bei der ungetrockneten Robinie. Da in der Holzfeuchte der einzige Unterschied zwischen den beiden Chargen bestand, ist zu vermuten, dass die Hydrolyse von Holzbestandteilen beim Dämpfen

des frischen Holzes, d.h. bei hohen Holzfeuchten, in stärkerem Maße stattgefunden hat.

7.2.6 Härte

Für die Verwendung als Parkett ist die Härte des Holzes bedeutend. Es wurde untersucht, ob durch die Dämpfung bei Temperaturen oberhalb 100° und den damit verbundenen Verlust an Holzkomponenten, eine Abnahme der Härte bei der Robinie festzustellen ist.

Die Härteprüfungen wurden nach der Methode von Brinell durchgeführt. Die Holzfeuchte der Proben betrug im Mittel 10%. Geprüft wurden die tangentialen Oberflächen.

Die folgende Tabelle zeigt die Härte der gedämpften Robinie im Vergleich zur ungedämpften Referenz.

Brinell-Härte (N/mm²)	
Ref.	31,3
110°_4h	31,7
120°_4h	30,4
130°_4h	30,1

Tab. 11 Brinell-Härten der Robinie, gedämpft nach der Trocknung

Die Härte von druckgedämpftem Holz wird im Vergleich zu ungedämpftem Material nicht reduziert.

Die Ergebnisse der Härteprüfung bei der Referenzserie und beim gedämpften Material entsprechen den Angaben in der Literatur (Molnar 1993). Eine signifikante Abnahme der Härte durch die Druckdämpfung konnte nicht festgestellt werden. Für die untersuchten Dämpfstufen kann kein messbarer Verlust an härtegebenden Substanzen des Holzes unterstellt werden. Die geringen Abweichungen der Härte von gedämpfter Robinie im Vergleich zur Referenz lassen sich mit den natürlichen Streuungen des Holzes, insbesondere durch die Rohdichteschwankungen erklären (Molnar 1993).

7.3 Vorversuche mit Pappel

Insbesondere der hohe und teilweise stark streuende Feuchtegehalt der Pappel (bedingt durch Nasskern) bewirkt, dass das Holz nur schwer ohne verbleibende Feuchtenester im Holz zu trocknen ist. Die Feuchtenester wirken sich vor allem bei der nachfolgenden Verarbeitung des Holzes in Form von ungleichmäßiger Schwindung aus. Dies äußert sich z.B. bei der Verarbeitung zu Leisten in Form einer welligen Oberfläche. Mit der Druckdämpfung wurde versucht, die Feuchtenester in der Pappel aufzulösen. Pappelholz wird normalerweise nicht gedämpft. Bedingt durch die großen Farbunterschiede im Pappelholz (Nasskernbereiche sind wesentlich dunkler) bietet sich jedoch eine Dämpfung zur Vergleichmäßigung der Farbe an, da im Rahmen der technischen Trocknung selbst bei Anwendung von Temperaturen weit über 100°C (Hochtemperaturtrocknung) keine Farbveränderung erzielt werden konnte. Durch die Hochtemperaturtrocknung kann bei Pappel aber die Trocknungszeit erheblich reduziert werden. Um die Holzfeuchte innerhalb der Charge bis auf ein annehmbares Maß zu vergleichmäßigen, muss aber bis zu 6% Holzfeuchte getrocknet werden (Vansteenkiste, Stevens, van Acker 1997). Da die Holzfeuchte von vorher getrocknetem Material durch die Druckdämpfung durchschnittlich um 2-4% angehoben wird, soll in einem Arbeitsgang die Farbe verändert und die Holzfeuchte von hochtemperaturgetrocknetem Material angehoben werden.

7.3.1 Erste Ergebnisse der Versuche mit Pappel

Über verschiedene Temperaturstufen mit unterschiedlichen Haltezeiten wurde eine kleinere Farbpalette im Vergleich zur Robinie erzeugt, die von hellen Brauntönen bis zu dunkleren rot/braunen Farben reicht (Bild 13). Die Farbreaktion wurde bei der Pappel homogen über den ganzen Querschnitt der eingesetzten Bretter erreicht. Ein Beispiel zeigt Bild 14. Dabei wurde auch der starke Farbunterschied zwischen dem teilweise dunklen Nasskernbereich und den hellen Bereichen des Splintholzes angeglichen.

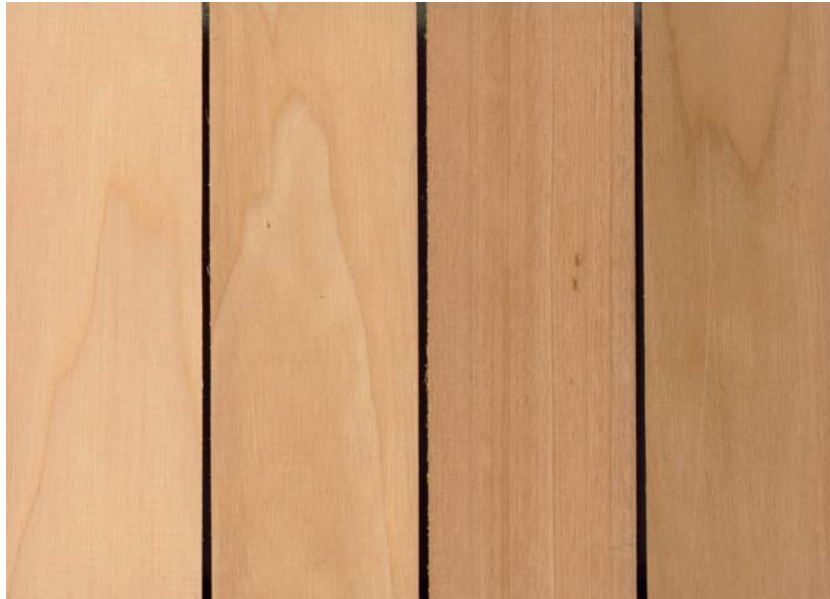


Bild 13 Farbspektrum der Pappel (95°C/12h, 120°C/4h, 140°C/2h, 140°C/6h)



Bild 14 Durchfärbung über den Querschnitt bei Pappel gedämpft mit 140°C und 2 Stunden Dämpfzeit

Mit der Druckdämpfung von frischer Pappel wurde als zusätzlicher Schwerpunkt der Untersuchungen überprüft, ob bei den hohen Temperaturen die pappelspezifischen Feuchtenester im Holz aufgelöst werden können. Hierzu wurde in einer Versuchsreihe frisches, gedämpftes Material nachträglich technisch getrocknet. In einer zweiten Serie wurde getrocknetes Material nachträglich druckgedämpft. Für beide Vorgehensweisen wurden nach der Behandlung Feuchtenester mit einem kapazitiven Holzfeuchtemessgerät festgestellt, so dass dieser Ansatz in den weiteren Untersuchungen nicht weiter verfolgt wurde.

Feuchtester können durch die Druckdämpfung von Pappel nicht abgebaut werden.

Bei der Druckdämpfung von frischem Pappelmaterial mit Anfangsfeuchten von über 150 % [u] zeigt sich auch, dass hohe Temperaturen (140°C) bei diesem sehr feuchten Material zu Zellkollaps führen können. Die hohe Temperatur induziert ein fast vollständiges Austreiben der in den Holzzellen enthaltenen Luft. Im Rahmen der Abkühlung entsteht in den nunmehr vollständig mit Wasser und Wasserdampf gefüllten Kapillaren eine starke Saugspannung, die letztendlich zu z.T. sehr starkem Zellkollaps führt.

In Bezug auf die Farbveränderung, die auch bei der Pappel mit zunehmender Temperatur intensiver wird, wird demnach bei gewünschten, hohen Temperaturen die Reduzierung der Holzfeuchte auf ein niedrigeres Niveau stattfinden müssen. Erst in einer zweiten Stufe wird die gerichtete Farbveränderung zu dunkleren Farben mit höherer Temperatur, mit weniger Risiko in Form von Dämpfschäden erreichbar sein.

Ähnlich wie bei der Robinie bietet sich bei der Pappel die Druckdämpfung nach der technischen Trocknung an.

7.4 Hauptversuche mit Pappel

7.4.1 Dämpfbedingungen

Aufgrund der in den Vorversuchen aufgetretenen Schädigungen bei frischem Material wurde in den weiteren Versuchen nur noch getrocknetes Material gedämpft. Gedämpft wurde Pappelschnittholz mit 40 mm Dicke und 2000 mm Länge. Die Breite des Materials variierte zwischen 110 und 180 mm. Die Holzfeuchte wurde vor der Dämpfung auf 10% eingestellt. Für die Pappel wurden die in Tab. 12 dargestellten Dämpfparameter gewählt.

	<i>Temperatur</i>			
Zeit [h]	95°	120°	130°	140°
4		X	X	X
10		X		
48	X			

Tab. 12 Dämpfbedingungen für Pappel

7.4.2 Untersuchungen der Farbe

Die Ergebnisse verschiedener Dämpfversuche wurden auf Unterschiede bezüglich der drei Farbkennzahlen L^* , a^* und b^* untersucht. Erwartungsgemäß lässt sich die Farbe des Pappelholzes nicht so intensiv beeinflussen, wie dies bei den anderen untersuchten Holzarten der Fall ist. Auch sind die Farbunterschiede zwischen den unter verschiedenen Bedingungen behandelten Proben sehr viel geringer im Vergleich zum Robinienholz. Tab. 13 zeigt die gemessenen Farbwerte der gedämpften Pappel.

<i>Farbwerte</i>	L^*	a^*	b^*
Ref.	79,5	3,4	17,2
95° 48h	69,9	7,3	23,9
120°4h	68,8	7,2	22,3
120°10h	62,9	8,7	23,6
130°4h	62,2	8,7	23,8
140°4h	58,4	9,3	24,2

Tab. 13 Farbwerte für gedämpfte Pappel und ungedämpfte Referenz

Die geringere Neigung zur Farbänderung ist auf die weniger starke Konzentration farbgebender Substanzen im Holz zurückzuführen. Bild 16

zeigt die Entwicklung des Farbtons in Abhängigkeit von den gewählten Dämpfparametern. Auch hier wurde die intensivste Farbveränderung bei maximaler Temperatur (140 °C) in Verbindung mit einer Haltezeit von 4 Stunden erreicht.



Bild 15 Farbe von ungedämpftem Pappelholz

Werden die Versuche 95° 48h und 120° 4h miteinander verglichen, so ist festzustellen, dass die höhere Temperatur eine Abnahme der Helligkeit verursacht. Jedoch unterscheiden sich die Helligkeitswerte nur geringfügig. Den Rot-Anteil betreffend, ist ebenfalls kein bedeutender Unterschied erkennbar. Der Gelb-Anteil ist jedoch beim Versuch mit 120 °C, 4 h geringer.



Bild 16 Von links nach rechts: Farbe der ungedämpften Pappel, gedämpft mit 95° 48h, 120° mit 4 und 10h, 130 und 140° mit 4 h

Der Vergleich der Versuche 120°10h und 130°4h zeigt, dass hinsichtlich der Helligkeit kein Unterschied besteht. Auch bezüglich der Rot-Anteile (a^* - Wert) und der Gelb-Anteile (b^* - Wert) sind die Unterschiede nur gering. In diesem Fall lässt sich bei gleichem Farbton die Haltezeit von 10 h auf 4 h reduzieren, wenn die Temperatur um 10 Grad auf 130 °C erhöht wird.

Die Vergleiche bestätigen die geringen Farbunterschiede zwischen den Proben der unterschiedlichen Versuche. Durch die geringere Konzentration von Inhaltstoffen ist bei der Pappel im Vergleich zur Robinie eine kleinere Farbpalette erreichbar. Für die Anwendung in der Praxis werden sich bezüglich der Farbe lediglich 2-3 visuell voneinander abgrenzbare Farbtöne erzeugen lassen. Die großen Farbunterschiede des Nasskerns zu den umgebenden unverfärbten Bereichen werden deutlich reduziert.

Die Ergebnisse von druckgedämpftem Pappelholz legen eine Verwendung als Ausstattungsholz im dekorativen Möbel- und Innenausbau bei geringen Beanspruchungen durchaus nahe.

7.4.3 Holzfeuchte

Für das technisch vorgetrocknete Pappelholz wurde vor den Druckdämpfversuchen eine Holzfeuchte von durchschnittlich 11 % ermittelt.

Die lange Haltezeit von 48 Stunden beim Versuch mit 95°C bewirkte eine Zunahme um 8 %. Die übrigen Versuche, die bei Temperaturen über 100 °C stattfanden führten ohne merklichen Einfluss der unterschiedlichen Dämpfparameter zu einer Erhöhung der Holzfeuchte um etwa 3 %. Schäden am Holz konnten nicht festgestellt werden.

<i>Holzfeuchte [u] (%)</i>	<i>Vor Dämpfung</i>	<i>Nach Dämpfung</i>
95° 48h	10,6	18,3
120°4h	10,9	12,6
120°10h	10,8	13,8
130°4h	10,9	13,3
140°4h	11,7	14,3

Tab. 14 Holzfeuchten der Pappel vor und nach der Dämpfung

7.4.4 Verschalung

Bereits vor dem Druckdämpfen lag bei der Pappel fast spannungsfreies Material vor. Durch die Druckdämpfung konnte somit kein Effekt mit deutlicher Reduzierung von Trocknungsspannungen festgestellt werden. Tab. 15 zeigt die gemessenen Spaltöffnungen der Verschalungsproben von vorher getrocknetem und anschließend druckgedämpftem Material.

<i>Verschalung [Spaltöffnung] (mm)</i>	<i>Vor Dämpfung</i>	<i>Nach Dämpfung</i>
95° 48h	0,8	-0,4
120°4h	0,7	-0,5
120°10h	0,9	-0,3
130°4h	0,6	-0,6
140°4h	0,7	-0,3

Tab. 15 Verschalung der Pappel vor und nach dem Dämpfen

7.5 Hauptversuche mit Buche

7.5.1 Dämpfbedingungen

Wie bei der Pappel, wurde aufgrund der möglichen, geringeren Farbvariabilität im Vergleich zur Robinie das Spektrum für die Dämpfparameter verringert. Die Abmessungen des gedämpften Materials betragen 40x100x600 mm³. Die Dämpfungen unter Überdruck wurden mit den folgenden Temperaturstufen für getrocknete Buche durchgeführt.

	<i>Temperatur</i>		
Zeit [h]	120°	130°	140°
4	X	X	X

Tab. 16 Dämpfbedingungen für Buche

7.5.2 Untersuchungen der Farbe

Ergebnisse

Auch wenn bei der Buche im Vergleich zur Robinie eine geringere Farbvariabilität erreicht wurde, gibt es im Vergleich mit der Pappel deutlichere Farbabstufungen. Die folgende Tabelle zeigt die Farbwerte für die durchgeführten Dämpfungen.

Farbwerte	L^*	a^*	b^*
Ref.	69,7	6,6	17,0
120°4h	60,1	8,1	16,7
130°4h	54,9	8,7	18,3
140°4h	45,8	9,7	16,1

Tab. 17 Farbwerte für gedämpfte Buche und ungedämpfter Referenz

Bei Temperaturerhöhung in Schritten von 10°C, lassen sich auch visuell deutlich voneinander unterscheidbare Helligkeiten der Farben erzielen. Bei den Farbwertanteilen, a^* , b^* Werte, fallen die Unterschiede geringer aus. Der dominante rote Ton der Buche bleibt aber bei den gedämpften Stücken farbbestimmend.



Bild 17 Von links nach rechts: ungedämpfte Buche, gedämpfte Buche bei 120, 130 und 140° mit 4 Stunden Dämpfzeit

Auch bei vorher getrocknetem Buchenschnittholz kann durch Druckdämpfen der Farbton gezielt verändert werden.

7.5.3 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte liegt vor Beginn der Versuche bei etwa 10,5 %. Sie nimmt, wie bei den anderen gedämpften Holzarten, bei der Buche infolge der Druckdämpfversuche um 3 % bis 5 % zu.

<i>Holzfeuchte [u] (%)</i>	<i>Vor Dämpfung</i>	<i>Nach Dämpfung</i>
120°4h	10,5	13,5
130°4h	11,5	14,8
140°4h	9,9	15,6

Tab. 18 Holzfeuchten der Buche vor und nach der Dämpfung

7.5.4 Verschalung

Durch die Druckdämpfung konnte beim nur gering verschaltem Buchenschnittholz kein deutlicher Effekt in Bezug auf Spannungsreduzierung erzielt werden.

<i>Verschalung [Spaltöffnung] (mm)</i>	<i>Vor Dämpfung</i>	<i>Nach Dämpfung</i>
120°4h	0,3	-0,1
130°4h	0,3	0,1
140°4h	0,7	-0,4

Tab. 19 Verschalung der Buche vor und nach dem Dämpfen

7.6 Hauptversuche mit Eiche

7.6.1 Dämpfbedingungen

Bei schärferen Dämpfbedingungen (hohe Temperaturen, lange Haltezeiten) besteht insbesondere bei Eichenholz die Gefahr von Holzstrahlrissen. Deshalb wurde auf Druckdämpfversuche mit Temperaturen von mehr als 120

°C verzichtet und wie auch bei der Pappel und bei der Buche nur getrocknetes Material gedämpft. Die Abmessungen des Eichenschnittholzes betragen 30 x60x1000mm³.

Für die Untersuchungen wurden folgende Temperaturen und Dämpfzeiten gewählt (Tab. 20).

	<i>Temperatur</i>		
Zeit [h]	95°	110°	120°
2			X
4		X	
10		X	
48	X		
72	X		

Tab. 20 Dämpfbedingungen für Eiche

Bei den Dämpftemperaturen wurden 120° C als Obergrenze gewählt, da die Eiche als noch temperaturempfindlicher in bezug auf Risse als die Robinie eingeschätzt wurde.

7.6.2 Untersuchungen der Farbe

Ergebnisse

Die Ergebnisse bei unterschiedlichen Parameterkombinationen wurden miteinander verglichen. Die Auflösung der Farbunterschiede bei verschiedenen Dämpfbedingungen ist bei der Eiche nicht sehr groß (Bild 18). Das erreichte Farbspektrum ist im Vergleich zur Robinie und zur Buche nur gering. Die Farbreaktion der Holzkomponenten setzt demnach bereits bei geringerer Dämpftemperatur ein und die Farbe verändert sich mit zunehmender Temperatur nur noch wenig. Tab. 21 zeigt die erreichten Farbveränderungen für die gedämpfte Eiche in Form der Farbkennzahlen L^*, a^*, b^* .

Farbwerte	L^*	a^*	b^*
Ref.	64,1	6,9	20,0
95°48h	52,1	8,7	17,0
95°72h	50,4	8,3	16,7
110°4h	56,2	7,0	17,8
110°10h	53,3	7,7	17,4
120°2h	56,6	6,7	17,4

Tab. 21 Farbwerte für gedämpfte Eiche und ungedämpfter Referenz

Die Proben der Versuche mit 95 °C 48 h und mit 110 °C 10 h zeigen bei der Betrachtung mit bloßem Auge große Ähnlichkeit hinsichtlich ihrer Farbe. Der t-Test führt zu folgenden Feststellungen:



Bild 18 Von links nach rechts: ungedämpfte Eiche, Eiche gedämpft mit 95° 48 und 72 Stunden, 110° mit 4 und 10 Stunden, 120° mit 2 Stunden

Hinsichtlich der Helligkeit (L^* Wert) lässt sich ein Unterschied feststellen. Trotz geringer Temperatur wird im Vergleich zur Referenz bei 95° 48h ein dunkler Farbton erreicht. Entscheidend wirkt sich hier offenbar nicht die Temperatur, sondern die längere Haltezeit bei diesem Versuch aus. Bezüglich des a^* Wertes (Rot-Anteil) besteht kein deutlicher Unterschied.

Die b^* Werte unterscheiden sich. Beim Versuch mit 95° 48h ist eine Verschiebung in Richtung blau zu erkennen. Eine Verlängerung der Dämpfzeit bei gleicher Temperatur auf 72 h führt zu einer weiteren Zunahme des Blau-Anteils (Abnahme des Gelb-Anteils) bei gleichzeitiger Zunahme des Rot-Anteils. Die Helligkeit hat bei der Dämpfung mit 72h noch einmal geringfügig abgenommen. Bei Erhöhung der Dämpftemperatur auf 110 und 120° C lässt sich bezüglich des Gelb-Anteils kein Unterschied mehr feststellen. Eine Verschiebung des b^* Wertes in Richtung blau wäre also theoretisch auch durch eine Erhöhung der Temperatur erreichbar. Wegen der breiten Holzstrahlen bei Eichenholz und der damit unvermeidlichen Rissbildungen bei hohen Temperaturen ist dies jedoch in der Praxis nicht zu empfehlen.

Viele Proben bei der Eiche zeigen bereits bei milden Dämpfbedingungen Holzstrahlenrisse. Diese Gefahr erhöht sich mit zunehmender Temperatur und Haltezeit.

7.6.3 Holzfeuchte

Vor den Druckdämpfversuchen wurde eine Holzfeuchte von durchschnittlich 11,4 % ermittelt. Beim Versuch Nr. 2 mit 72 h Haltezeit kommt es zu einer Erhöhung der Holzfeuchte um etwa 7 %. Die übrigen Versuche bewirken nur eine geringe Erhöhung der Holzfeuchte um bis zu 4 %.

Holzfeuchte [u] (%)	Vor Dämpfung	Nach Dämpfung
95°48h	11,4	11,0
95°72h	11,4	18,7
110°4h	11,4	13,3
110°10h	11,4	15,3
120°2h	11,4	12,8

Tab. 22 Holzfeuchten der Eiche vor und nach der Dämpfung

Die geringe Feuchteabnahme bei der Dämpfung mit 95°48 Stunden lässt sich nicht ohne weiteres klären. Hier kann nur vermutet werden, dass während der langen Abkühlphase über 2 Tage am Wochenende Trocknungsbedingungen im Druckdämpfkessel vorlagen.

7.6.4 Verschalung

Die Verschalung ist vor den Druckdämpfversuchen so gering, dass sie kaum messbar ist. Eine wesentliche Veränderung tritt infolge der Druckdämpfversuche nicht ein.

Verschalung [Spaltöffnung] (mm)	Vor Dämpfung	Nach Dämpfung*
95°48h	0,3	0,2
95°72h	0,3	0,2
110°4h	0,2	0,1
110°10h	0,2	-0,1
120°2h	0,2	-0,3

Tab. 23 Verschalung der Eiche vor und nach dem Dämpfen

7.7 Weiterführende Untersuchungen zur Farbe

Die in den bisherigen Untersuchungen erreichte Farbvariabilität der Eiche durch das Druckdämpfen ist nicht sehr hoch. Die untersuchten Proben zeigten jedoch eine sehr gleichmäßige Verfärbung über den Querschnitt und keine visuell erkennbaren Farbunterschiede auf den gehobelten Oberflächen. Deshalb soll in einer weiteren Serie versucht werden, getrocknetes und ungleichmäßig verfärbtes Material (z.B. helle Wolken in Brettmitte) durch die Druckdämpfung farblich zu homogenisieren.

Mit der gleichen Zielsetzung wird in einer weiteren Versuchsreihe ungleichmäßig verfärbte Buche druckgedämpft. Insbesondere die durch die Sturmschäden mit Zeitverzug aufgearbeiteten und teilweise nassgelagerten Hölzer weisen nach der Trocknung oft erhebliche Farbunterschiede auf. Wie auch bei der Eiche, soll versucht werden, durch die Druckdämpfung eine gleichmäßige Farbe herbeizuführen.

7.7.1 Farbhomogenisierung bei Eiche

Vorgehensweise

An einigen Schnittholzabschnitten getrockneter Eiche, 25 und 35 mm dickes Material, wurde exemplarisch versucht, ein Farbangleich zu erreichen. Um

keine zu dunkle Farbe zu erhalten, wurde für die Dämpfung eine Temperatur von 110°C bei 4 Stunden Dämpfzeit gewählt. Bild 19 zeigt den Querschnitt eines gedämpften Eichenbohlenabschnitts.

Ergebnis

Die hellen Zonen im Innenbereich des Schnittholzes (Bild 19 linker, ungedämpfter Querschnitt) wurden durch die Dämpfung verringert, so dass die untersuchten Stücke nach der Behandlung einen gleichmäßig dunklen Farbeindruck geben.

Auch bei den übrigen Schnittholzabschnitten wurde der Farbunterschied im Vergleich zu den helleren Zonen deutlich reduziert. Die Schnittholzabschnitte wiesen jedoch insgesamt eine dunklere Farbe auf (Bild 20).



Bild 19 Farbangleich bei fleckiger Eiche. Links ungedämpft, Rechts nach dem Dämpfen



Bild 20 Farbangleich bei streifiger Eiche, rechts ungedämpft, links gedämpft

Farbfehler bei Eiche, z.B. helle Wolken in Brettmitte, können durch nachträgliches Druckdämpfen wirksam ausgeglichen werden. Dabei wird jedoch eine dunklere Holzfarbe eingestellt.

7.7.2 Farbhomogenisierung bei Buche

7.7.2.1 Farbgleich von streifigem Holz

Bei der Buche werden teilweise nach der Trocknung ungewünschte Farbunterschiede festgestellt, die aufgrund von ungleichmäßiger Feuchte im Stamm, durch zu hohe Temperaturen bei der Lagerung vor der Trocknung oder z.B. durch Einlauf oder unterschiedlicher Inhaltstoffkonzentration in benachbarten Bereichen des Schnittholzes verursacht werden (Koch et.al. 2000). Die Farbunterschiede lassen sich meist erst nach der technischen Trocknung, nach dem Hobeln feststellen, sind aber kaum durch geänderte Prozessführung bei der Kammertrocknung z.B. durch geringere Trocknungstemperatur vermeidbar, da die Ursachen für die Entstehung der Farbunterschiede meist schon während der Vortrocknung oder Lagerung nach dem Einschnitt entstehen. Um die Entwertung von solch ungleichmäßig verfärbten Material gering zu halten, wird mit der Druckdämpfung versucht, eine gleichmäßig durchgefärbte, wenn auch dunklere Farbe, ähnlich bei vor der Trocknung gedämpftem Material, zu erreichen.



Bild 21 Helle und dunkle Bereiche bei getrockneter Buche

Vorgehensweise

Das gleiche Screening, wie im vorherigen Versuch mit der Eiche, wurde mit einer kleinen Auswahl von verfärbten Schnittholzstücken für die Buche durchgeführt. Die Probenstücke wiesen ebenfalls hellere und stärker verfärbte Zonen auf. Auch wenn die Ursache für die Verfärbung im Vergleich zur Eiche unterschiedlich ist und die Farbänderung aufgrund der unterschiedlichen Inhaltstoffe und deren Farbänderungsvermögen bei einer bestimmten Temperatur verursacht wird, wurde zunächst als Startpunkt die gleiche Dämpfstufe 110°C mit 4 Stunden Dämpfzeit gewählt.

Ergebnis

Durch eine insgesamt dunklere Farbe mit mehr Rotanteil nach dem Dämpfen wurde auch bei der Buche bei 110°C mit 4 Stunden Dämpfzeit der Unterschied zwischen hellen und dunkleren Bereichen wirksam verringert. Dabei nahm die Farbe der helleren Bereiche den Ton der dunkler verfärbten Zonen an (Bild 22).

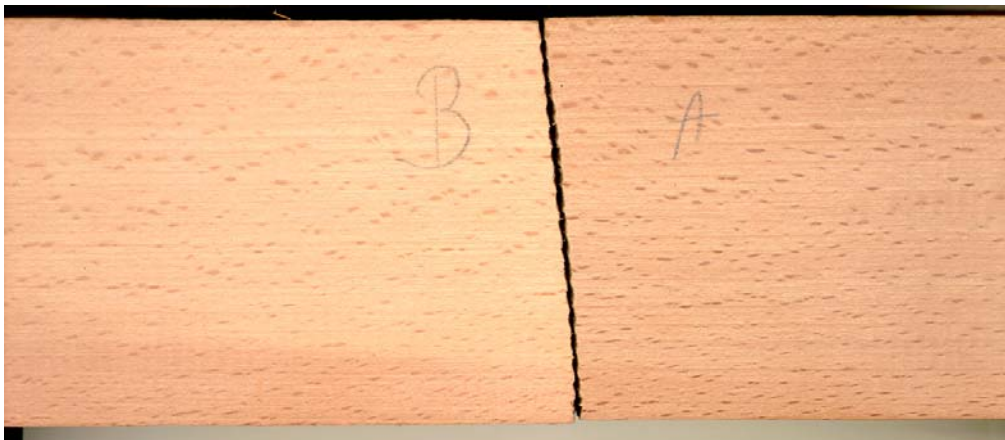


Bild 22 Farbhomogenisierung bei streifiger Buche

7.7.2.2 Farbgleich bei vergrautem Holz

Als weiteres Farbproblem bei luft-vorgetrockneter Buche tritt die Vergrauung auf (Schmidt, Kreber, Boon 2001). Hierbei sind die ungewünschten Verfärbungen ebenfalls erst nach der technischen Trocknung erkennbar. Die Vergrauung tritt während der Lagerung bei ungetrocknetem und ungedämpftem Schnittholz oder bei Parkett-Rohfriesen auf (Koch et al.2000), (Luostarinen 2001). Die Vergrauung des Materials ist innerhalb einer Charge

meist unterschiedlich ausgeprägt (Bild 23). Durch diese unterschiedliche Verfärbung entspricht solch Material nicht mehr den geforderten hohen Ansprüchen an ein Sortiment mit möglichst gleichmäßig heller, ungedämpfter Buche.

Durch Druckdämpfen unter verschiedenen Dämpfbedingungen wurde versucht, die graue Verfärbung des Materials zu reduzieren und eine Farbangleichung zu erreichen.

Material und Versuchsaufbau

Da in den vorherigen Versuchen mit zunehmender Temperatur bzw. Dämpfzeit die Farbe des Materials mehr an Rotanteil aufwies und dunkler wurde, sollte in den Dämpfungen dieser Charge bei geringerer Temperatur im Hochdruckbereich begonnen werden. Dabei sollten die optimale Temperatur bzw. Dämpfzeit gefunden werden, mit denen die Vergrauung wirksam reduziert wird, mit nur geringem Verlust an Helligkeit .



Bild 23 Vergrauung bei ungedämpfter, hell getrockneter Buche

Für die Untersuchung stand eine Charge mit ca. 600 getrockneten Parkett-Rohfriesen aus Buche mit den Abmessungen 320x77x33 mm³ zur Verfügung. Vor den Untersuchungen wurde eine Stichprobe von 30 Friesen entnommen, um die Farbabweichungen innerhalb der Charge zu ermitteln. Die Voruntersuchung ergab, dass die graue Verfärbung in dieser Charge nicht bei allen Stücken und auch nicht mit der gleichen Intensität auftrat. Ebenso konnte die Verfärbung den einzelnen Friesen über die Oberfläche

nicht angesehen werden. Deshalb mussten größere Stichproben aus der Charge entnommen werden und somit der Dämpfeinfluss bzw. die Beurteilung der Farbhomogenisierung an einer größeren Anzahl von Stücken vorgenommen werden. Für die Druckdämpfung wurden mehrere zufällige Stichproben mit je 40 Stücken für die Untersuchung in jeder der ausgewählten Dämpfstufen gezogen.

Zur Beurteilung des Dämpferfolgs wurde eine Stichprobe als ungedämpfte Referenz mit entnommen. Die Proben wurden anschließend mit unterschiedlichen Temperaturstufen und Dämpfzeiten behandelt. Zur Beurteilung der Farbe wurden die Rohfriese in der Mitte aufgetrennt (Bild 24), die Oberflächen gehobelt und anschließend die Farbwerte der innen liegenden Oberflächen mit dem Farbmessgerät bestimmt. Durch die Farbmessung an den inneren Oberflächen der aufgeschnittenen Frieze wurde der Einfluss der Dämpfung auf die Farbe über den Brettquerschnitt nachgewiesen. Auf jeder Oberfläche wurden 3 Messungen durchgeführt, so dass für jedes Stück die Farbe aus 6 Messungen gemittelt wurden.



Bild 24 Versuchsanordnung Farbmessung bei vergrauter Buche

Für die Untersuchung wurden folgende Temperaturen und Haltezeiten gewählt.

	<i>Temperatur [t]</i>			
Zeit [h]	ref°	105°	110°	115°
0	X			
2		X	X	X
4		X	X	

Tab. 24 Temperatur und Dämpfzeit für vergraute Buche

Ergebnisse

Bild 25 zeigt im Überblick den Farbeindruck aus den Dämpfungen. Mit zunehmender Dämpftemperatur verringert sich die Helligkeit der Stücke. Alle Stücke wiesen nach der Dämpfung eine insgesamt bräunlichere Färbung auf.

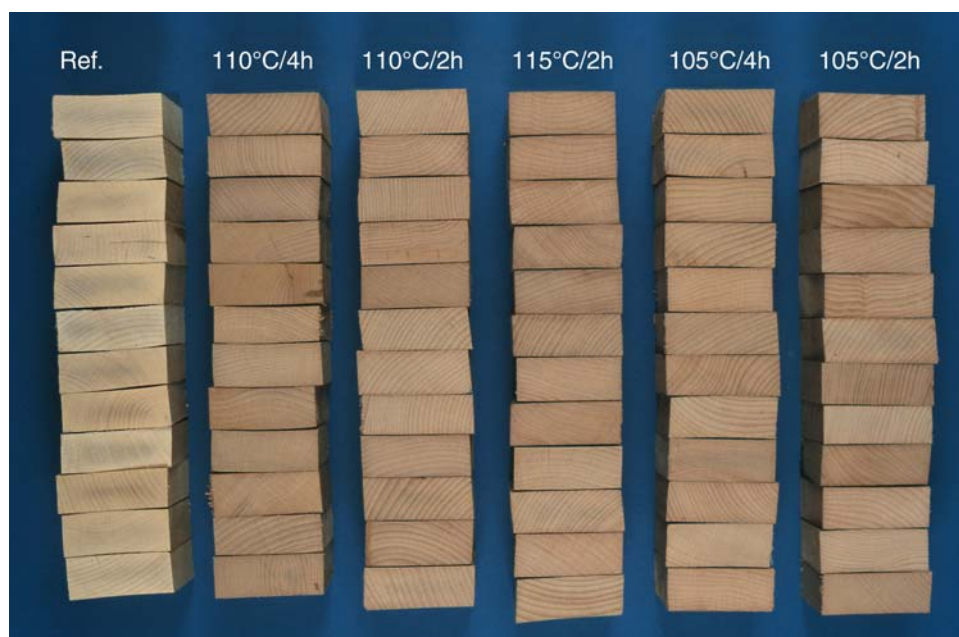


Bild 25 Farbpalette von Buche im Querschnitt

Bei allen Dämpfstufen war bei den aufgeschnittenen Friesen keine Vergrauung erkennbar (Bild 26). Mit zunehmender Dämpftemperatur und Haltezeit nahm die dunklere Färbung als visueller Farbeindruck nur gering zu. Die Helligkeitswerte (L^*) liegen bei allen Dämpfstufen etwa in der

gleichen Größenordnung, so dass innerhalb der Temperaturspanne zwischen 105 und 115°C kein zunehmender Helligkeitsverlust auftrat. Der Rot-Anteil nahm im Vergleich zur Referenz bei allen Dämpfungen zu. Bei 105 und 110°C wurden fast die gleichen Werte gemessen. Lediglich bei der Dämpfung mit 115°C und 2 Stunden Haltezeit nahm noch einmal der Rot-Anteil zu. Der Gelb-Anteil nahm ebenfalls bei der Dämpfung ab und lag in allen Stufen in der gleichen Größenordnung.

Farbwerte	L^*	a^*	b^*
Ref.	75,07	5,93	17,94
105°2h	69,02	7,76	16,01
105°4h	68,06	7,96	16,33
110°2h	68,62	7,84	16,23
110°4h	67,78	7,65	15,74
115°2h	66,84	8,57	16,62

Tab. 25 Farbwerte der gedämpften Buche (Vergrauung)

Die vergrauten Bereiche wurden durch die Überlagerung von mehr Rotanteil an der Holzfarbe und durch die Abnahme der Helligkeit abgebaut.

Farbunterschiede können bei getrocknetem Buchenschnittholz durch nachträgliches Druckdämpfen verringert werden. Für den Abbau des Farbfehlers bei vergrauter Buche reicht bereits eine Dämpftemperatur von 105° aus.



Bild 26 Vergleich der Dämpfungen bei vergrauter Buche

7.8 Verleimung von druckgedämpftem Robinienholz

Robinienholz wird seit mehreren Jahren verstärkt als Ersatz für Tropenholz in der Fensterbranche (lamellierte Fensterkanteln) eingesetzt. Für den Einsatz als Fensterholz bereitet die Verleimbarkeit Probleme. Im Rahmen dieser Studie wurde der Einfluss des Druckdämpfens auf die Verleimbarkeit von Robinienholz untersucht.

7.8.1 Versuchsaufbau

30 mm dicke und 1100 mm lange Lammellen aus unterschiedlichen Dämpfstufen wurden zu 2-lagigen Kanteln verleimt. Die Holzfeuchte der technisch getrockneten Proben wurde durch klimatisierte Lagerung über 8 Wochen im Normklima 20°C/65 % rel. Luftfeuchte auf ca. 12% [u] eingestellt. Die klimatisierten Hölzer wurden unmittelbar vor der Verleimung auf 25 mm Lamellenstärke ausgehobelt. Zum Vergleich mit den einzelnen Dämpfstufen wurde ungedämpfte Robinie verleimt und mitgeprüft.

Die Verleimung erfolgte mit dem MUF-Leim Kauresin 681 plus Härter 686 von der BASF. Der Pressdruck betrug 1,25 N/mm² bei einer Presszeit von 24 Stunden. Die Leimaufragsmenge lag bei 350 g/m². Auf den Einsatz von

unterschiedlichen Klebstoffen wurde verzichtet, da in vorherigen Untersuchungen von Frühwald und Pitzner der ausgewählte Klebstoff Kauresin 681 für ungedämpfte Robinie die besten Ergebnisse gezeigt hat und der Untersuchungsschwerpunkt in dieser Studie auf den Einfluss des Druckdämpfens gelegt wurde (Frühwald, Pitzner 2001). Für die Untersuchungen wurden folgende Dämpfstufen gewählt Tab. 26:

	Temperatur [t]		
Zeit [h]	ref°	110°	130°
0	X		
2		X	
4			X
10		X	

Tab. 26 Dämpfstufen für verleimte Robinie

An den verleimten Kanten wurden die Querkzugfestigkeit und die Scherfestigkeit geprüft. Zur Beurteilung der Verleimungsqualität wurde der entstehende Holzbruchanteil bei der Prüfung mit herangezogen. Zum Vergleich bzw. zur Einschätzung der erzielbaren Festigkeiten der gedämpften Robinie werden in den Grafiken der Auswertung die erreichten Festigkeiten und Holzbruchanteile von verleimter Fichte mit aufgeführt. Die zum Vergleich herangezogenen Fichtenkanten wurden mit dem gleichen Klebstoff hergestellt.

7.8.2 Ergebnisse der Querkzugprüfung

Für die ungedämpfte Robinie wurde eine hohe Querkzugfestigkeit der verleimten Kanten gemessen. Die gedämpften Hölzer weisen eine geringere Festigkeit im Vergleich zur Referenz auf. Mit zunehmender Dämpftemperatur kommt es zu einer Abnahme der Querkzugfestigkeit. Eine Verlängerung der Dämpfzeit beim Versuch mit 110°C von 2 auf 10 Stunden zeigte keine weitere signifikante Abnahme der Querkzugfestigkeit. Bei der Betrachtung der beiden Dämpfstufen 110°C/10h und 130°C/4h wurde bei der mit höherer Temperatur gedämpften Charge trotz geringerer Dämpfzeit eine stärkere Abnahme der Festigkeit ermittelt.

Querzugprüfungen verleimter Robinienlamellen
 Festigkeiten in verschiedenen Dämpfstufen - Mittelwerte; Min; Max
 Holzart: Robinia pseudoacacia / Leim: MUF BASF

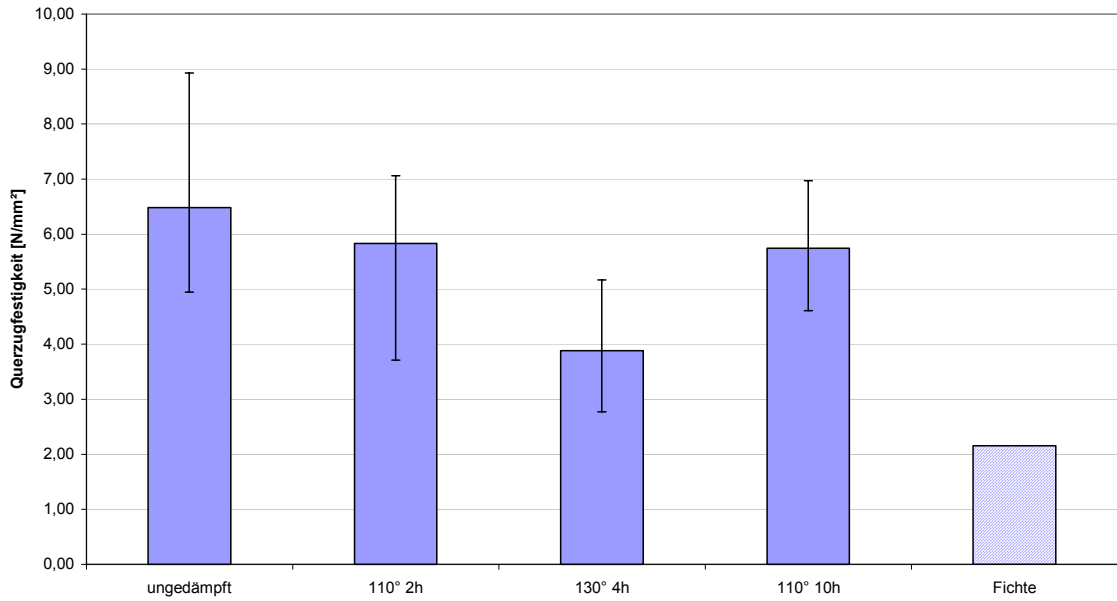


Bild 27 Querzugprüfung von verleimter Robinie

Querzugprüfungen verleimter Robinienlamellen
 Holzbruchanteile in verschiedenen Dämpfstufen - Mittelwerte; Min; Max
 Holzart: Robinia pseudoacacia / Leim: MUF BASF

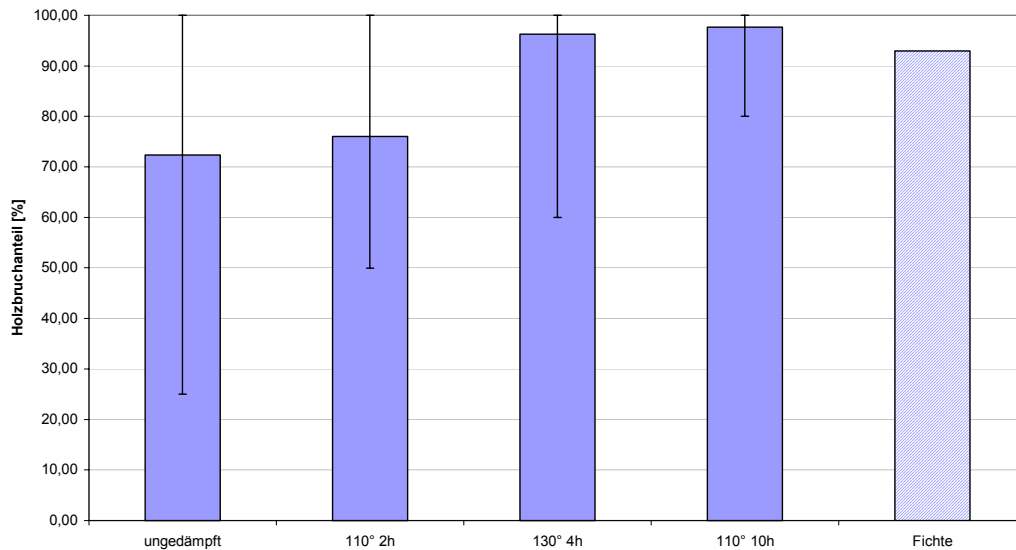


Bild 28 Holzbruchanteil bei der Querzugprüfung

Bei der Betrachtung des Holzbruchanteils der Prüfung zeigt sich, dass die Abnahme der Querzugfestigkeit bei gedämpften Robinienholz auf die

verringerte Holzfestigkeit bei höheren Temperaturen zurückzuführen ist. Die verlängerte Dämpfzeit bei der Serie mit 110° C bewirkt im Vergleich zu 2h Dämpfzeit bei gleicher Temperatur mehr Holzbruchanteil bei nur geringer Abnahme der Querkzugfestigkeit.

Die Abnahme der Festigkeit ist auf die reduzierte Holzfestigkeit zurückzuführen. Zur Verdeutlichung des Dämpfeinflusses auf die Festigkeit wurde an einem Teil der gedämpften Chargen die Bruchschlagarbeit ermittelt.

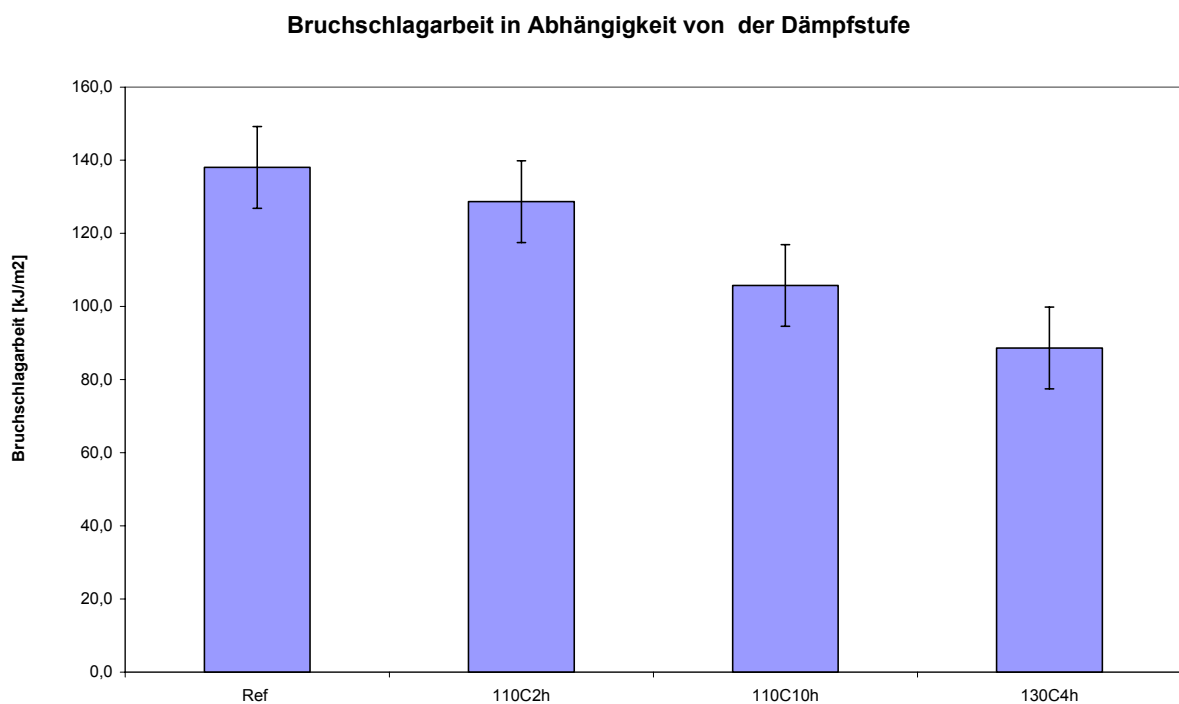


Bild 29 Bruchschlagarbeit von gedämpfter Robinie

Den geringsten Einfluss auf die Querkzugfestigkeit hatte die kurze Dämpfzeit bei 110°C mit 2 Stunden Haltezeit. Dennoch lagen die Festigkeiten bei dieser Serie niedriger als bei der ungedämpften Referenz. Ein erwarteter, positiver Effekt bei verleimtem und vorher gedämpftem Holz durch den Spannungsabbau bei der Dämpfung war durch die verringerten Festigkeiten nach der Dämpfung nicht feststellbar.

Auch bei den Kanteln aus der Dämpfstufe 130° mit 4 Stunden Haltezeit liegen die Querkzugfestigkeiten von gedämpfter Robinie noch fast um das zweifache höher als bei der Fichte.

7.8.3 Ergebnisse der Scherfestigkeitsprüfung

Die Scherfestigkeitsprüfung wies wie bei der Querkzugprüfung die höchsten erreichten Festigkeiten bei der ungedämpften Referenz auf. Mit zunehmender Dämpftemperatur und bei längerer Dämpfzeit verringerte sich die Festigkeit des Robinienholzes. Die ermittelten Werte liegen über den in der Literatur angegebenen mittleren Festigkeiten bei verleimter Robinie mit unterschiedlichen Leimen (Gehri 1993).

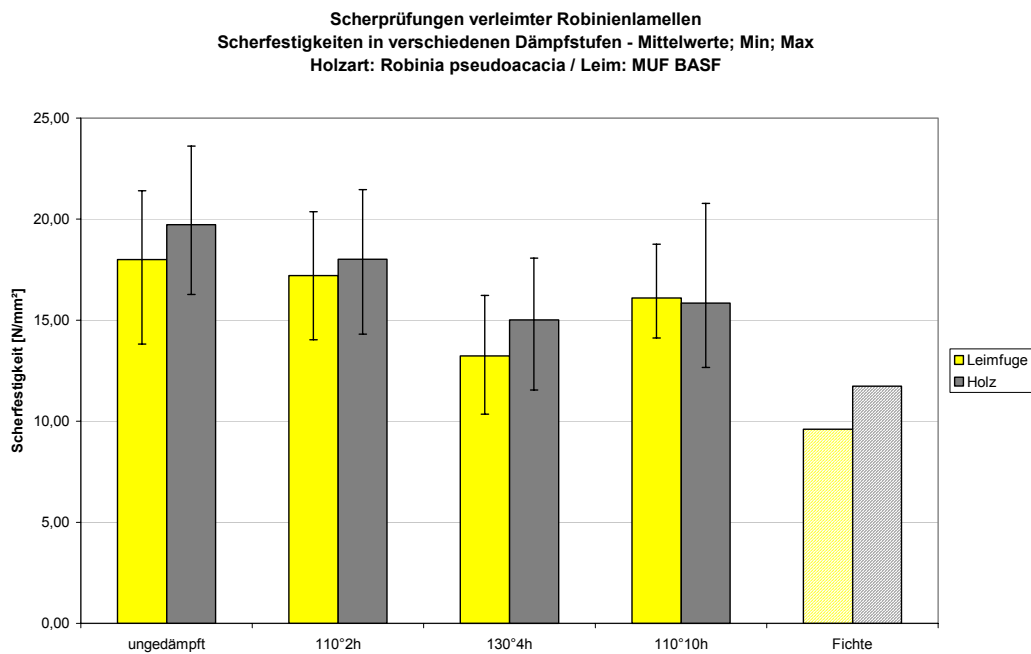


Bild 30 Scherfestigkeit von gedämpfter und verleimter Robinie

Scherprüfungen verleimter Robinienlamellen
 Holzbruchanteile bei verschiedenen Dämpfstufen - Mittelwerte; Min; Max
 Holzart: Robinia pseudoacacia / Leim: MUF BASF

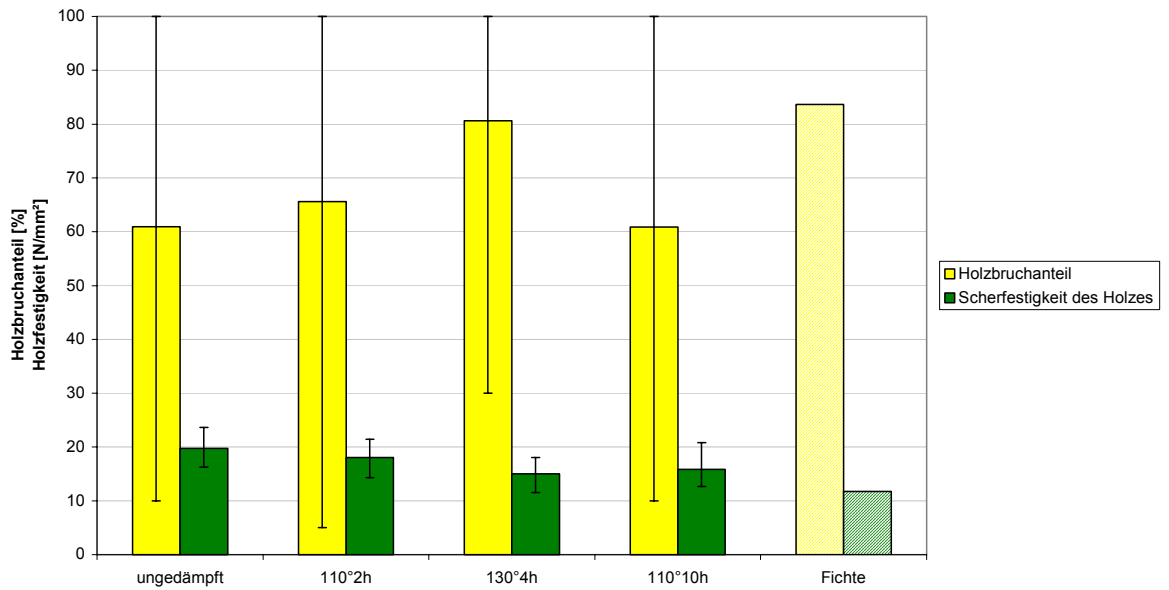


Bild 31 Holzbruchanteil bei der Prüfung der Scherfestigkeit der Verleimung von gedämpfter Robinie

Der eingesetzte Leim Kauresin 681 eignet sich gut für die Verleimung von druckgedämpfter Robinie.

8 Auslegung und Kalkulation einer industriellen Anlage

In direkter Zusammenarbeit mit dem im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Anlagenhersteller wurde eine Druckdämpfanlage im industriellen Maßstab ausgelegt und kalkuliert. Aus den Untersuchungen im Labormaßstab wurde folgendes Anforderungsprofil einer industriellen Anlage abgeleitet.

Der Arbeitsbereich der Anlage ist für Temperaturen von bis zu 140°C ausgelegt, was einem Arbeitsdruck von 5 bar entspricht. Der Druckkessel ist zylindrisch mit einem Innendurchmesser von 1600 mm, wodurch die Anlage mit Holz-Paketen von 1200 mm Kantenlänge bestückt werden kann. Die Länge des Kessels beträgt 9000 mm, so dass sich ein Bruttovolumen des Kessels von ca. 19,1 m³ ergibt. Das Nettovolumen an möglicher Holzmenge liegt im kalkulierten Beispiel bei ca. 10 m³, da das Holz auf Stapelleisten bzw. in Kreuzstapelweise eingebracht werden muss, um ein gleichmäßiges Dämpfergebnis in der ganzen Charge zu erzielen. Die Materialausführung des Kessels erfolgt in Edelstahl, um die Beständigkeit der Anlage gegen die korrosive Wirkung der Inhaltstoffe von Laubhölzern im Dampfkondensat zu gewährleisten.

Als Regelung wird ein einfacher Programmregler eingesetzt, da die Dämpfpläne lediglich nach Temperatur und Zeit aufgebaut sind und sich der Druck im Autoklaven zwangsläufig einstellt. Auf eine Klimaregelung, die auch die Feuchte berücksichtigt, wurde verzichtet, da hierfür der Aufwand als zu groß eingeschätzt wird und die Trocknung des Materials mit diesem Verfahren nicht im Vordergrund steht.

Investitionskosten

Bild 32 zeigt die Investitionskosten für eine Druckdämpfanlage im Überblick.

<i>Investition</i>			
			<i>Euro</i>
<i>Anlage</i>	<i>Kessel 1800kgDampf/h</i>	73.170,00	
	<i>Isolierung</i>	5.200,00	
	<i>Einfahrwagen</i>	11.315,00	
	<i>Dampferzeuger</i>	57.950,00	
	<i>Economiser</i>	2.525,00	
<i>Zusatzkosten</i>			
	<i>Installations Folgekosten</i>	10.000,00	
		160.160,00	Gesamtsumme

Bild 32 Investitionskosten einer Druckdämpfanlage

Da in vielen Betrieben keine Versorgung mit Dampf für Drücke von über 5 Bar betriebsseitig vorhanden ist, wurde in der nachfolgenden Kalkulation ein Dampfgenerator mit berücksichtigt. Für die Aufstellung der Anlage im Freien und zur Reduzierung der Wärmeverluste bei der Dämpfung, wird eine zusätzliche Isolierung des Kessels vorgesehen. Zur einfacheren Beschickung enthält die Anlage ein Gleissystem mit Waagen. In Abhängigkeit der betrieblichen Gegebenheiten vor Ort, wie z.B. schon vorhandene Anschlüsse an das Stromnetz, Betonarbeiten, etc., werden im Beispiel Investitionsfolgekosten veranschlagt.

Kostenkalkulation für druckgedämpftes Holz

Der Zinsfuß für die Investition wird mit 7 % angenommen. Für die Nutzungsdauer wird ein Zeitraum von 10 Jahren unterstellt, bei einer Auslastung der Anlage mit 200 Dämpfungen im Jahr. Je nach Dämpfzeit wird für jeden Durchlauf 24 Stunden angesetzt. Hierbei wird auch bei geringer Dämpfzeit von 2 Stunden die Beladezeit, die Aufheizzeit und die Abkühlzeit mit berücksichtigt und von einem Ein-Schichtbetrieb ausgegangen.

Die laufenden Reparatur- und Wartungskosten werden mit 30% der jährlichen Abschreibung angesetzt. Die Lohnkosten für jede Dämpfung ergeben sich aus der Kalkulation von 4 Stunden Aufwand für einen Durchlauf. Dabei sind die Beschickung der Anlage sowie Kontrolle während

der Dämpfung und die Entladung mit berücksichtigt. Die Energiekosten setzen sich aus der erforderlichen thermischen und der elektrischen Energie zusammen. Als Brennstoff für den mit in der Berechnung kalkulierten Dampferzeuger ist leichtes Heizöl vorgesehen. Bild 33 zeigt im Überblick die Kostenkalkulation für die Druckdämpfung anhand der vorher beschriebenen Annahmen.

Kostenkalkulation Druckdämpfkessel		
Investitionskosten	160.160,00	Euro
Nutzungsdauer:	10,00	Jahre (a)
Wahrscheinliche Auslastung:	200,00	Dämpfung/a
Energieeinsatz	122,00	Euro/Dämpfung
Zinsfuß:	7,00	%
Faktor für Reparatur und Wartung:	0,30	
Lohnkosten:	80,00	Euro/Dämpfung
Faktor Lohnnebenkosten:	1,05	
Leistung: Holzmenge	10,00	m ³ /Dämpfung
1. Grundkosten		
Abschreibungen:	16.016,00	Euro/a
Zinskosten:	5.605,60	Euro/a
Reparatur und Wartungskosten:	4.804,80	Euro/a
2. Sachkosten		
Sonstige Kosten:	2.000,00	Euro/a
Verwaltungs- und Organisationskosten:	4.000,00	Euro/a
Lohnkosten:	16.000,00	Euro/a
Lohnnebenkosten:	16.800,00	Euro/a
Energiekosten	24.400,00	Euro/a
<u>Gesamtkosten</u>		
	89.626,40	Euro/a
	448,13	Euro/Dämpfung
	44,81	Euro/m³

Bild 33 Kalkulation der Kosten für die Druckdämpfung

Falls im Betrieb eine Anlage zur Dampferzeugung bereits vorhanden ist, reduzieren sich die Kosten für die Druckdämpfung. In diesem Szenario sind nicht die anteiligen, zuordenbaren fixen Kosten für die im Beispiel bereits vorhandene Anlage zur Dampferzeugung enthalten.

Gesamtkosten

79.648,03	Euro/a
398,24	Euro/Dämpfung
39,82	Euro/m³

Bild 34 Szenario: Kosten ohne Investition Dampferzeuger

Die Kosten für die Druckdämpfung erscheinen mit rund 45 Euro akzeptabel für eine Weiterveredelung des Holzes. Als Beispiel sind aktuell für Buchenleimholzplatten, Mehrerlöse bei gedämpftem Material zwischen 130-160 Euro zu erzielen (Euwid 2002 v.15.08.2002).

Die 2000 m³ Jahresleistung der im Beispiel aufgeführten Druckdämpfanlage wurden unter der Annahme gewählt, dass unterschiedliche Holzarten mit verschiedenen Zielsetzungen, wie z.B. auch Farbhomogenisierung bei der Buche gedämpft werden. Die konzipierte Druckdämpfanlage kann auch zur Dämpfung von Hölzern unter Atmosphärendruck bei Temperaturen von unter 100°C eingesetzt werden. Für die ausschließliche Herstellung von dunklem Parkettholz aus Robinie übersteigt die Anlagenkapazität sicher das mögliche Marktpotential. Bei einer geringeren Größe einer Druckdämpfanlage muss aber berücksichtigt werden, dass die Investitionskosten nicht linear mit einer verringerten Anlagenkapazität abnehmen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Durchführung der im Rahmen des Forschungsprojektes geplanten Versuche zum Druckdämpfen von Schnittholz wurde eine bestehende Druckdämpfanlage modifiziert und modernisiert. Die Anlage wurde in Betrieb genommen und einem umfangreichen Testprogramm unterzogen.

Im Rahmen von Vorversuchen wurden eine Reihe von Druckdämpfungen mit Robinien- und Pappelholz durchgeführt. Bei beiden Holzarten konnte eine breite Palette von Farbtönen sowohl an frischem Material als auch an zuvor technisch getrocknetem Material erzeugt werden.

Für die Hauptversuche wurde Robinienrundholz beschafft, eingeschnitten und als Schnittholz teilweise technisch getrocknet. Frisches und technisch getrocknetes Robinienholz wurde bei unterschiedlichen Bedingungen druckgedämpft. Anschließend folgte die Eigenschaftsuntersuchung auf Farbe, Feuchte, Sorptionsverhalten, Härte und Verleimungsfestigkeit. Neben der Robinie wurden auch Buche, Pappel und Eiche druckgedämpft. Die Zielsetzung bei der Druckdämpfung dieser Holzarten war im wesentlichen die Farbhomogenisierung bei ungleichmäßig verfärbten Hölzern.

In Zusammenarbeit mit dem im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Anlagenhersteller ist eine Druckdämpfanlage im industriellen Maßstab auf Grundlage der Untersuchungen im Labormaßstab ausgelegt worden. Für die Kosten des Verfahrens wurde auf dieser Grundlage die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt. Als Hilfestellung für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit für potentielle Anwender wurden die Kosten des Verfahrens in Euro je Kubikmeter druckgedämpftes Schnittholz bei Vollausslastung der Anlage ermittelt.

Literatur

Anonymus 2002: Euwid Holz und Holzwerkstoffe, Nr. 33 v. 15.08.2002, Euwid Europäischer Wirtschaftsdienst, Gernsbach

Anonymus 2001: Euwid Holz special Bau und Innenausbau, Ausgabe 1/2001, Euwid Europäischer Wirtschaftsdienst, Gernsbach

Burtin, P., Jay-Allemand, C., Charpentier, J-P., Janin, G. 2000: Modifications of Hybrid Walnut (*Juglans nigra* x *Juglans regia*) Wood Colour and Phenolic Composition Under Various Steaming Conditions, *Holzforschung* VOL.54/2000/No.1, Walter de Gruyter Berlin, New York

DIN 5033 1980: Farbmessung, Deutsches Institut für Normung

Dwianto, W., Morooka, T., Norimoto, M., Kitajima, T. 1999: Stress Relaxation of Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) Wood in Radial Compression under High Temperature Steam, *Holzforschung* VOL 53/1999/No. 5, Walter de Gruyter, Berlin New York

Dwianto, W., Morooka, T., Norimoto, M. 2000: Compressive Creep of Wood under High Temperature Steam, *Holzforschung* VOL 54/2000/No. 1, Walter de Gruyter, Berlin New York

Dwianto, W., Morooka, T., Norimoto, M. 1999: Method for measuring viscoelastic properties of wood under high temperature and high pressure steam conditions, Japan Wood Research Society

Frühwald, A., Bernasconi, A., Pitzner, B. 2001: Verklebung einheimischer dauerhafter Holzarten zur Sicherung von Marktbereichen im Außenbau, BFH-Arbeitsbericht Institut VI, Nr. 2001/5, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft in Hamburg

Gehri, E. 1993: Verleimung, Das Holz der Robinie, ETH Zürich, Abteilung für Forstwirtschaft, Fachbereich Holzkunde und Holztechnologie, Fortbildungskurs 1993

Haslett, A.N., Dakin, M. 2001: Effect of pressure steaming on twist and stability of Radiata pine lumber, *Forest Products Journal* Vol. 51, No. 2

Haslett, A.N., Davy, B., Dakin, M., Bates, R., 1999: Effect of pressure Drying and pressure steaming on warp and stiffness of Radiata pine, *Forest Products Journal* Vol. 49, No. 6

Haslett, A.N., Dakin, M. 2001: Effect of pressure steaming on twist and stability of Radiata pine lumber, *Forest Products Journal* Vol. 51, No. 2

Keey, R.B., Langrish, T.A.G., Walker, J.C.F. 2000: Kiln-Drying of Lumber, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

- Koch, G., Bauch, J., Puls, J., Schwab, E., Welling, J. 2000:** Holzverfärbungen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* [L.]) und Möglichkeiten vorbeugender Maßnahmen, Holz-Zentralblatt Jg. 126, Nr. 6, 2000, DRW-Verlag, Leinfelden- Echterdingen
- Keylwerth, R. 1949:** Grundlagen der Hochtemperaturtrocknung des Holzes, Holz-Zentralblatt Jg. 75 Nr. 76, 1949, DRW- Verlag, Leinfelden- Echterdingen
- Kollmann, F. 1951:** Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 1. Band, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg
- Kübler, H. 1966:** Die Eigenschaften Gedämpfter Hölzer, Zeitschrift Parkett, Bd. 15, 1966, No. 4,5,8
- Kühl, J., 1996:** Farbveränderungen an Robinienholz mit Hilfe technischer Maßnahmen, Diplomarbeit FB Biologie der Universität Hamburg
- Luostarinen, K., Luostarinen J. 2001:** Discolouration and deformations of birch parquet boards during conventional drying, Wood Science and Technology 35 (2001), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Luostarinen, K., Möttönen, V., Asikainen, A., Luostarinen, J. 2002:** Birch (*Betula pendula*) Wood Discolouration during Drying. Effect of Environmental Factors and Wood Location in the trunk, Holzforschung, Vol. 56/ 2002/ No. 4, Walter de Gryter, Berlin, New York
- Militz, H., Tjeerdesma, B. 2001:** Heat treatment of wood by the PLATO-process, Cost E 22 proceedings of special seminar held in Antibes, France, edited by A.Rapp, BFH-Hamburg
- Milota, M.R., 2000:** Warp and Shrinkage of Hem-Fir Stud Lumber Dried at Conventional And High Temperatures, Forest Products Journal, Vol. 50, No. 11/12
- Minolta 1997:** Chroma-Meter, Broschüre, Minolta Europe GmbH, Langenhagen
- Mitsui, K., Takada, H., Sugiyama, M., Hasegawa, R. 2001:** Changes in the Properties of Light-Irradiated Wood with Heat Treatment, Holzforschung, Vol. 55/2001/No. 6, Walter de Gryter, Berlin, New York
- Molnar, S, Peszlen, I., Richter, H.G., Tolvaj, L., Varga, F. 1998:** Influence of steaming on selected wood properties of black locust (*Robinia pseudoacacia* [L.]), Acta Faculta Lignensis 1998
- Molnar, S., 1993:** Die technischen Eigenschaften des Robinienholzes, Das Holz der Robinie, ETH Zürich, Abteilung für Forstwirtschaft, Fachbereich Holzkunde und Holztechnologie, Fortbildungskurs 1993
- Molnar, S., Lang, M. 1993:** Die Säge-und Furniertechnologische Verarbeitung und die hydrothermische Behandlung des Robinienholzes, Das

Holz der Rbinie, ETH Zürich, Abteilung für Forstwirtschaft, Fachbereich Holzkunde und Holztechnologie, Fortbildungskurs 1993

Pang, S., Simpson, I.G., Haslett, A.N. 2001: Cooling and steam conditioning after high-temperature drying of *Pinus radiata* board: experimental investigation and mathematical modelling, *Wood Science and technology*, 35 (2001), , Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

pr. EN 13183-1: Round and sawn timber- Method of measurement of moisture content, rosa Entwurf, Europäisches Komitee für Normung

pr. ENV 14464: Sawn timber- Method for assesment of case- hardening, Norm Vorentwurf, Juni 2002, Europäisches Komitee für Normung

Rosen, H.N., Laurie, S.E. 1983: Mechanical properties of conventionally kiln-dried and pressure steam-dried yellow-popular and red oak, *Forest Products Journal*, J.33(1): 50-52

Rosen, H.N. 1980: Psychrometric relationships and equilibrium moisture content of wood at temperatures above 212 F, *Wood and Fiber*, 1980 V.12(3)

Rosen, H.N. 1982: Predicting Wood Surface Moisture Content During Water Vapor Sorption, *Wood Science* 14(3), *Forest Products Research Society* 1982

Rosen, H.N.: Drying lumber above atmospheric pressure. Development of a prototype dryer, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, Forest Science Laboratory, Southern Illinois University

Sandland, K.M. 1998: Dimension Stabilisation of Wood by Heat Treatment, *Proceedings, COST E8 Conference, Firenze*

Schmidt, E.L., Kreber, B., Boon, S. 2001: Fumigation of Red Beech logs for reducing gray stain in lumber, *Forest Products Journal*, Vol.51, No.5

Tolvaj, L., Horvath-Szovati, E., Safar, C. 2000: Colour Modification of Black Locust by Steaming, *Drevarsky Vyskum*, 45(2) 2000

Vansteenkiste, D., Stevens, M., van Acker, J. 1997: High temperature drying of fresh sawn popular wood in an experimental convective dryer, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 55 (1997)

Welling, J. 1994: EDG Richtlinie "Trocknungsqualität"; Ein neues Werkzeug für die Europäische Holzwirtschaft, *EDG-Recommendation on Assessment of Drying Quality*, In: *Proceedings 6. Internat. EDG-Trocknungskonferenz 1994*, Hamburg

Yilgor, N., Unsal, O., Kartal, S.N. 2001: Physical, mechanical and chemical properties of steamed beech wood, *Forest products journal*, Vol. 51, No. 11/12

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Holzfeuchtegleichgewicht oberhalb 100 °C nach Keylwerth 1949 ...	9
Bild 2	Temperaturverlauf bei der Druckdämpfung.....	10
Bild 3	Druckdämpfanlage im Labormaßstab	15
Bild 4	Darstellung des L* a* b*- Farbsystems (Minolta 1997)	17
Bild 5	Aufbau des Farbmesskopfes (Minolta 1997)	18
Bild 6	Einschnittmuster für die vergleichenden Eigenschaftsuntersuchungen für Robinie	21
Bild 7	Erreichbare Farbpalette bei Robinienholz (von links nach rechts: ungedämpft, 120°C/4h, 140°C/2h).....	26
Bild 8	Farbvergleich; von links nach rechts: ungedämpfte Robinie, druckgedämpfte Robinie mit 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C bei jeweils 4 h Haltezeit.....	27
Bild 9	Von links nach rechts: ungedämpfte Robinie, druckgedämpfte Robinie mit 2, 4 und 10 h Haltezeit bei jeweils 120 °C.....	28
Bild 10	Von links nach rechts: ungedämpfte Robinie, druckgedämpfte Robinie mit 2, 4 und 10 h Haltezeit bei jeweils 130 °C.....	28
Bild 11	Farbvergleich: unten Versuch mit 130 °10 h, oben Versuch mit 140 °C 2h bei vorher getrockneter Robinie	32
Bild 12	Verringerung der Verschalung durch Druckdämpfen bei technisch vorgetrocknetem Robinienholz; Anwendung der Mittenschnitt- Methode, links vor, rechts nach dem Druckdämpfversuch, Versuch (140 °C 2 h)	39
Bild 13	Farbspektrum der Pappel (95°C/12h, 120°C/4h, 140°C/2h, 140°C/6h).....	43
Bild 14	Durchfärbung über den Querschnitt bei Pappel gedämpft mit 140°C und 2 Stunden Dämpfzeit.....	43
Bild 15	Farbe von ungedämpftem Pappelholz.....	46
Bild 16	Von links nach rechts: Farbe der ungedämpften Pappel, gedämpft mit 95° 48h, 120° mit 4 und 10h, 130 und 140° mit 4 h.....	47
Bild 17	Von links nach rechts: ungedämpfte Buche, gedämpfte Buche bei 120, 130 und 140° mit 4 Stunden Dämpfzeit.....	50
Bild 18	Von links nach rechts: ungedämpfte Eiche, Eiche gedämpft mit 95° 48 und 72 Stunden, 110° mit 4 und 10 Stunden, 120° mit 2 Stunden 53	
Bild 19	Farbangleich bei fleckiger Eiche. Links ungedämpft, Rechts nach dem Dämpfen	56

Bild 20	Farbangleich bei streifiger Eiche, rechts ungedämpft, links gedämpft.....	56
Bild 21	Helle und dunkle Bereiche bei getrockneter Buche.....	57
Bild 22	Farbhomogenisierung bei streifiger Buche.....	58
Bild 23	Vergrauung bei ungedämpfter, hell getrockneter Buche.....	59
Bild 24	Versuchsanordnung Farbmessung bei vergrauter Buche.....	60
Bild 25	Farbpalette von Buche im Querschnitt.....	61
Bild 26	Vergleich der Dämpfungen bei vergrauter Buche.....	63
Bild 27	Querzugprüfung von verleimter Robinie.....	65
Bild 28	Holzbruchanteil bei der Querzugprüfung.....	65
Bild 29	Bruchschlagarbeit von gedämpfter Robinie.....	66
Bild 30	Scherfestigkeit von gedämpfter und verleimter Robinie.....	67
Bild 31	Holzbruchanteil bei der Prüfung der Scherfestigkeit der Verleimung von gedämpfter Robinie.....	68
Bild 32	Investitionskosten einer Druckdämpfanlage.....	70
Bild 33	Kalkulation der Kosten für die Druckdämpfung.....	71
Bild 34	Szenario: Kosten ohne Investition Dampferzeuger.....	72

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Dämpfparameter Robinie.....	26
Tab. 2	Helligkeitswerte L^* bei unterschiedlichen Dämpfparametern bei vorher getrockneter Robinie.....	30
Tab. 3	Rot-grün Anteile a^* bei unterschiedlichen Dämpfparametern bei vorher getrockneter Robinie.....	30
Tab. 4	Gelb-blau Anteile b^* bei unterschiedlichen Dämpfparametern bei vorher getrockneter Robinie.....	31
Tab. 5	Farbunterschiede frische/getrocknete Robinie, L^* Werte.....	33
Tab. 6	Farbunterschiede frische/getrocknete Robinie, a^* , b^* Werte	34
Tab. 7	Holzfeuchten vor und nach der Dämpfung bei Robinie.....	36
Tab. 8	Verschalung getrockneter Robinie vor und nach dem Dämpfen....	38
Tab. 9	Ausgleichsfeuchten für Robinie, gedämpft nach dem Trocknen	40
Tab. 10	Ausgleichsfeuchten für Robinie, gedämpft vor dem Trocknen ...	40
Tab. 11	Brinell-Härten der Robinie, gedämpft nach der Trocknung	41
Tab. 12	Dämpfbedingungen für Pappel.....	45
Tab. 13	Farbwerte für gedämpfte Pappel und ungedämpfte Referenz....	45
Tab. 14	Holzfeuchten der Pappel vor und nach der Dämpfung.....	48
Tab. 15	Verschalung der Pappel vor und nach dem Dämpfen.....	49
Tab. 16	Dämpfbedingungen für Buche.....	49
Tab. 17	Farbwerte für gedämpfte Buche und ungedämpfter Referenz ...	50
Tab. 18	Holzfeuchten der Buche vor und nach der Dämpfung.....	51
Tab. 19	Verschalung der Buche vor und nach dem Dämpfen.....	51
Tab. 20	Dämpfbedingungen für Eiche.....	52
Tab. 21	Farbwerte für gedämpfte Eiche und ungedämpfter Referenz.....	53
Tab. 22	Holzfeuchten der Eiche vor und nach der Dämpfung.....	54
Tab. 23	Verschalung der Eiche vor und nach dem Dämpfen	55
Tab. 24	Temperatur und Dämpfzeit für vergraute Buche	61
Tab. 25	Farbwerte der gedämpften Buche (Vergrauung).....	62
Tab. 26	Dämpfstufen für verleimte Robinie	64