

Vortrocknung der Holzoberfläche für die Verklebung bei erhöhter Holzfeuchte

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Titels „Diplom-Ingenieur“
an der Universität für Bodenkultur Wien

eingereicht von
Georg Schweizer BSc

Betreuer: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat. techn. Dr.h.c. Alfred Teischinger
Co-Betreuer: Ing. Robert Stingl

Institute of Wood Science and Technology
Department of Material Sciences and Process Engineering
University of Natural Resources and Life Sciences
BOKU - Vienna

September, 2017

Kurzfassung

Durch ein neues Einschnittverfahren von Rundholz ist es nötig, das dabei entstehende Schnittgut im nassen Zustand zu Holzquerschnitten in Bauteilgröße zu verkleben. Die Technologie der Naßverklebung ist jedoch derzeit für eine bauaufsichtliche Zulassung nicht verlässlich genug und seitens des Klebstoffherstellers wird für ein dafür vorgesehenes Klebstoffsystem eine oberflächennahe Abtrocknung der Holzoberfläche gefordert.

In der vorliegenden Arbeit wurde als Arbeitshypothese die Möglichkeit einer oberflächennahen Abtrocknung der Holzoberfläche bei hoher Luftgeschwindigkeit und erhöhter Temperatur in einer kurzen Zeit von wenigen Minuten gesehen. Ziel der Arbeit war es, eine Versuchsanordnung im Labormaßstab für die oberflächliche Abtrocknung von Holzoberflächen zu entwickeln und dabei die Tiefe der Abtrocknung in das Holzinnere bei bestimmten Trocknungszeiten und Trocknungstemperaturen zu ermitteln und in einem Diagramm bzw. Modell abzubilden. Mit einem entsprechenden Versuchsaufbau konnte ein Modell entwickelt werden, dass die Zeitdauer für verlässliche Abtrocknung der Holzoberfläche in Abhängigkeit von der gewählten Trockentemperatur bei einer definierten Luftgeschwindigkeit und unterschiedlichen Ausgangsfeuchten darstellt.

Schlüsselwörter: Holztrocknung; Vortrocknung; Trocknungsrate;
Nassverklebung; Verklebung bei erhöhter Holzfeuchte;

Abstract

A new cutting process of logs requires that the resulting timber is glued together in wet state to form wood cross-sections in the size of the structural component. However, the technology of wet bonding is currently not reliable enough for a technical approval and the manufacturers adhesive system requires to dry the surface of the wood.

The possibility of a surface-near drying of timber at high air velocity and elevated temperature in a short period of a few minutes was considered as working hypothesis in the present work. The aim of the study was to develop an experimental setup for drying of wood surfaces in laboratory scale, to determine the depth of drying into the wood interior at certain drying times and drying temperatures and to depict it in a diagram or model. A model could be developed with a corresponding experimental set-up. The required time for reliable drying of the wood surface is used as a function of the selected drying temperature at a defined air speed and different starting humidities.

Keywords: wood drying; predrying; drying rate; green gluing; wet gluing; gluing at elevated moisture content;

Danksagung

Die Arbeit entstand auf Anregung und in enger Kooperation mit der Firma Stora Enso Austria GmbH. Herrn DI Markus Hirmke/Stora Enso ist für die intensive Unterstützung und die Diskussionen im Laufe der Arbeit zu danken.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Stand des Wissens.....	3
2.1.	Holz und Wasser	3
2.2.	Holztrocknung	8
2.3.	Verklebung	15
2.4.	Feuchteverteilung im Stammquerschnitt und Überlegungen zur Oberflächenabtrocknung	17
2.5.	Nassverklebung.....	19
3.	Material und Methode.....	22
3.1.	Material	22
3.2.	Methode	24
3.2.1.	Trocknung	24
3.2.2.	Spanabnahme	25
3.2.3.	Feuchtebestimmung.....	26
3.2.4.	statistische Auswertung.....	27
4.	Ergebnisse	28
5.	Zusammenfassung.....	32
6.	Tabellenverzeichnis.....	34
7.	Abbildungsverzeichnis:.....	34
8.	Literaturverzeichnis	36

1. Einleitung

Sowohl aus ökonomischen als auch ressourcenpolitischen Gründen steht die Holzindustrie vor der Herausforderung, den Rohstoff Holz immer besser zu nützen und die größtmögliche Wertschöpfung daraus zu erzielen wie bei beispielsweise bei (Sathre & Gustavsson 2009) und (Teischinger 2016) diskutiert wird. Eine zunehmende Nutzung des Rohstoffes Holz führt neben einer allgemeinen Ressourcenverknappung durch eine steigende Weltbevölkerung und globalem Wirtschaftswachstum (FAO 2009) sowie durch eine angestrebte Dekarbonisierung im Zuge der Bioökonomie (Teischinger 2016) zu einer möglichen Ressourcenverknappung beim Rohstoff Holz.

Die Holzindustrie ist gekennzeichnet durch verschiedene Prozessketten, die eng miteinander verbunden sind (Abbildung 1). Durch die kaskadische Nutzung (Arnold et al. 2009), wie in Abb. 1 dargestellt, kommt es bereits zu einer gesteigerten Ressourceneffizienz innerhalb der gesamten Holzindustrie.

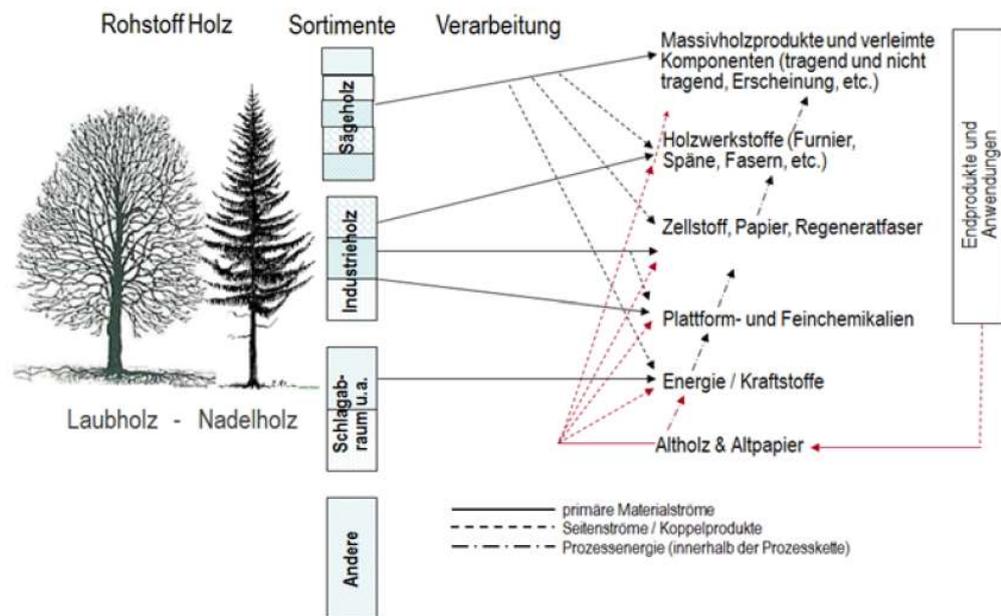


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der miteinander verbundenen Prozessketten für den Rohstoff Holz inklusive von Materialrückführungen im Zuge von Recycling (Teischinger 2014)

Doch besonders in der Prozesskette Massivholzprodukt gibt es eine vergleichsweise geringe Ressourceneffizienz bzw. eine geringe Ausbeute vom Stamm hin zum Bauteil (Abbildung 2). Im Laufe der Prozesskette fallen immer

wieder Neben- und Koppelprodukte wie Rinde, Schwarten, Spreißel, Hackgut und Späne in zum Teil großer Menge an.

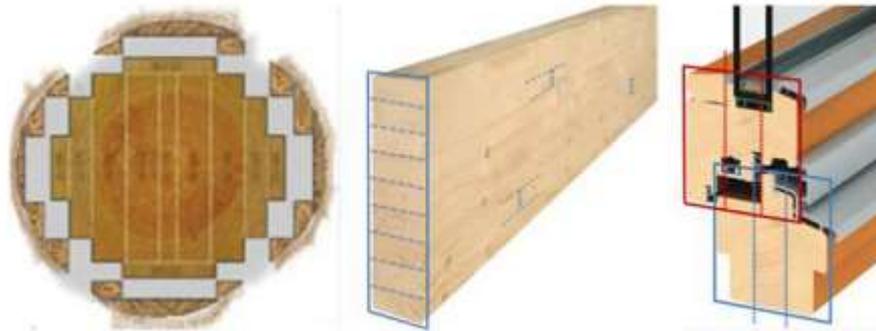


Abbildung 2: Vereinfachte und schematische Darstellung von zwei ausgewählten Produkten mit Hinblick auf die „Ausbeute“ vom Rohstoff zum Endprodukt (Teischinger 2014).

Trotz Zunahme der Ressourceneffizienz in den letzten Jahrzehnten sind noch immer Verbesserungspotenziale vorhanden. Daher gibt es immer wieder neue Versuche die Prozesskette Massivholz bzw. den Auftrennprozess von Rundholz neu zu gestalten und die Menge der Neben- und Koppelprodukte zu reduzieren. (Teischinger 2014). Müller et al. (2015) zeigen systematisch verschiedene Möglichkeiten des mechanischen Aufschlusses, um das Holz anatomisch optimal zu nutzen und so die Materialausbeute zu steigern.

Bei der Partnerfirma Stora Enso (Kontakt: DI M. Hirmke) wurde ein völlig anderer Ansatz zum Auftrennen von Rundholz entwickelt. Die dabei aufgetrennten Rundholzsegmente müssen, um den Prozess effizient zu gestalten, am besten im sägefrischen Zustand zu Bauteilen verklebt werden. Die große Herausforderung an diesem Prozess ist die Naßverklebung der sägerauen Segmente. Die marktüblichen Leime und Klebstoffe erlauben keine verlässliche direkte Naßverklebung, sodass die zu verklebenden Substratflächen vor der Klebung kurz angetrocknet werden müssen.

Dieser Prozess der kurzen Abtrocknung der Substratoberfläche ist das zentrale Thema der vorliegenden Arbeit. Ziel der Arbeit ist eine Abtrocknung der zukünftigen Interphase um bzw. unter den Fasersättigungsbereich bei möglichst kurzer Trockenzeit und Temperaturen unterhalb von 100 °C. Dabei wird die Radialseite des Holzes getrocknet. Das Trocknungsgefälle läuft in tangentialer Richtung.

Als Arbeitshypothese wurde die Möglichkeit gesehen, bei hoher Luftgeschwindigkeit und erhöhter Temperatur (siehe Pkt. 3.1) die Holzoberfläche in einer kurzen Zeit von wenigen Minuten unter den Fasersättigungspunkt abzutrocknen.

Ziel der Arbeit war es, eine Versuchsanordnung im Labormaßstab für die oberflächliche Abtrocknung von Holzoberflächen zu entwickeln und dabei die Tiefe der Abtrocknung in das Holzinere bei bestimmten Trocknungszeiten und Trocknungstemperaturen zu ermitteln und in einem Diagramm bzw. Modell abzubilden.

Zusätzlich sollte in einem einführenden Teil die Literatur zu dem Thema der oberflächennahen Trocknung sowie der damit verbundenen Grenzflächenphänomene zu dokumentieren.

2. Stand des Wissens

2.1. Holz und Wasser

Holz ist ein natürlicher, anisotroper und hygroskopischer Werkstoff, der sich durch große Variabilität im Aufbau auszeichnet. Im lebenden Baum übernimmt das Holz drei Hauptaufgaben: Wasser- und Nährstoffleitung, Festigung und Speicherfunktion. Holz weist eine hierarchische Struktur auf und lässt sich grob in die makroskopische, mikroskopische und submikroskopische Ebene einteilen (a, b und e in Abbildung 4) (Niemz 1993).

Nadelhölzer besitzen einen einfacheren Aufbau als Laubhölzer. Nadelholz besteht aus nur zwei Zelltypen (Tracheiden und Parenchym). Tracheiden bilden den Großteil der Holzsubstanz des Nadelholzes und übernehmen mit Wasserleitung und Festigung zwei Hauptaufgaben. Die Speicherfunktion wird von lebenden Parenchymzellen übernommen. Holz wird während des Dickenwachstums des Baumes von der Wachstumsschicht, dem Kambium (KA in Abbildung 3), nach Innen hin gebildet. Nach Außen werden vom Kambium der Bast und die Borke, gemeinhin als Rinde bekannt, gebildet. Im Verlauf der Jahreszeiten in den gemäßigten Breiten entstehen durch zyklisches Wachstum innerhalb makroskopischer Ebenen Jahrringe. Ein Jahrring besteht aus Früh- und Spätholz, die sich im Porenanteil und folglich in der Dichte unterscheiden (a in Abbildung 4). Die im Frühling für die Wasserleitung gebildete Frühholzzelle hat einen größeren Porenanteil (Durchmesser der Tracheiden bei Nadelholz) als die im Spätsommer gebildete dichte festigende Spätholzzelle (Braun 1998).

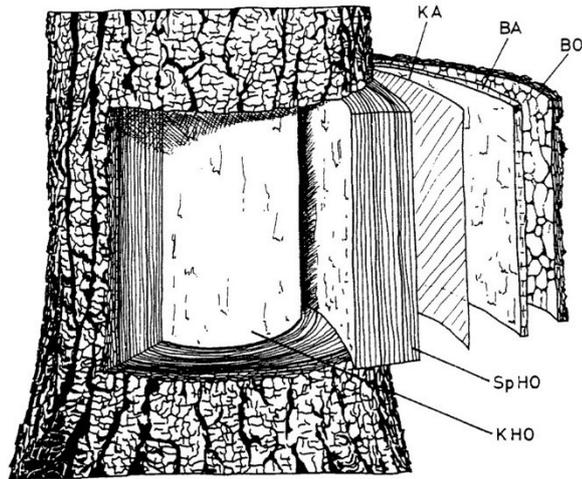


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Stammes: KHO – Kernholz, SpHO – Splintholz, KA – Kambium, BA – Bast, BO – Borke (Braun 1998)

Die Zellwand der Tracheiden ist stark verdickt und verholzt. Zwei Tracheiden werden durch die Mittellamelle voneinander getrennt. Diese besteht aus Hemicellulose und Protopektin. An dieser Mittellamelle wird die Zellwand der Tracheiden, bestehend aus drei Schichten (Primär-, Sekundär- und Tertiärwand) nach innen angelagert (b in Abbildung 4). Die drei Schichten unterscheiden sich in Dicke, Zusammensetzung und Orientierung der Cellulosefibrillen.

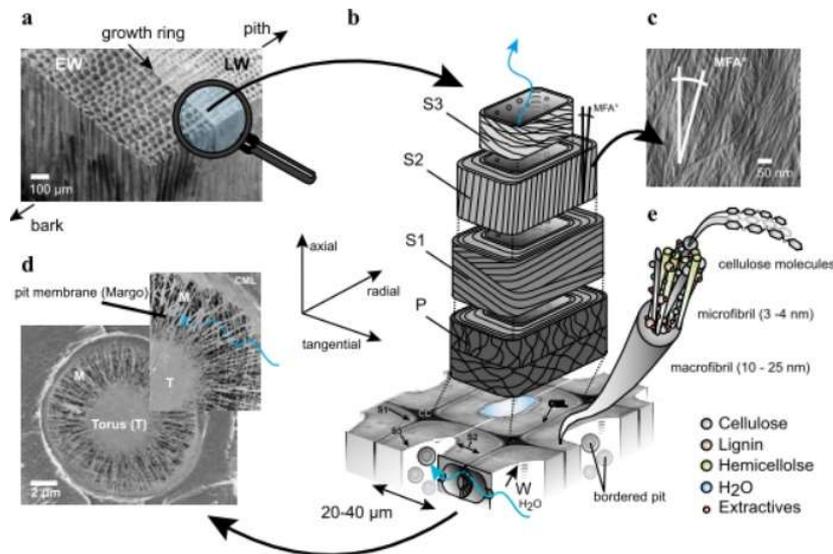


Abbildung 4: Schematische Darstellung der hierarchischen Struktur und Zusammensetzung von Holz: (a) elektronenmikroskopisches Bild eines Nadelholzblocks mit Frühholz (EW) und Spätholz (LW); (b) genauere Betrachtung der einzelnen Zellwandschichten (P: Primär, S1-, S2-, S3-Schicht); (c) Atomkraftmikroskop (AFM) Bild einer sekundären Zellwand mit dem Cellulose-Mikrofibrillenwinkel (MFA). (d) Tüpfel, die den Wasserfluss zwischen verbundenen Tracheiden ermöglichen; (e) zeigt eine einzelne Makrofibrille mit ihrer Zusammensetzung (Legende) (Felhofer 2016)

Die Primärwand besteht aus einer Matrix aus Hemicellulose und Pektin, in die eine Gerüstsubstanz aus Cellulosefibrillen eingelagert ist. Die Fibrillen sind ohne Ordnung in die Matrix eingebettet und nehmen mit 15 % einen kleinen Anteil ein. Die Primärwand bleibt dadurch flexibel und kann sich während des Wachstums weiter strecken. Die sekundäre Zellwand wird nach dem Strecken- und Dickenwachstum der Zelle gebildet und nimmt den größten Teil der fertigen Zellwand ein. Auch sie besteht aus drei Schichten, der S1-, S2- und S3-Schicht. Die drei Schichten unterscheiden sich erneut in Dicke, Celluloseanteil und Orientierung der Cellulosefibrillen. Der relative Celluloseanteil der gesamten Sekundärwand ist mit 90 % sehr hoch. Die S1-Schicht wird direkt an die Primärwand angelagert. Ihre Cellulosefibrillen sind parallel angeordnet und weisen eine Orientierung quer zur Zellachse auf. Die S2-Schicht ist die dickste Schicht der gesamten Zellwand. Sie setzt sich aus zugfester Cellulose, eingelagert in eine Matrix aus Hemicellulose und druckfestem Lignin, zusammen. Die Cellulosefibrillen in dieser Schicht sind längs orientiert. Die Mikrofibrillen verlaufen in einer flachen Schraube um die Zellen. Der Winkel, um den die Fibrillen von der Längsachse der Zellen abweichen, wird als Mikrofibrillenwinkel (MFA) bezeichnet (c in Abbildung 4). Mehrere solche Schichten mit wechselnder Orientierung (MFA) bilden die gesamte S2-Schicht. Dadurch ergeben sich die optimalen Festigkeitseigenschaften der Zellwand. Die S3-Schicht kommt nur bei Parenchymzellen vor. Die Zusammensetzung und Orientierung dieser Schicht ähneln der Primärwand. Die Tertiärwand schließt die Zellwand zum Lumen hin ab. Sie ist dünn und aufgrund eines hohen Ligninanteils widerstandsfähig gegen chemischen und enzymatischen Abbau. Die Tracheiden sind über Tüpfel (Abbildung 5; d in Abbildung 4) miteinander verbunden (Braun 1998).

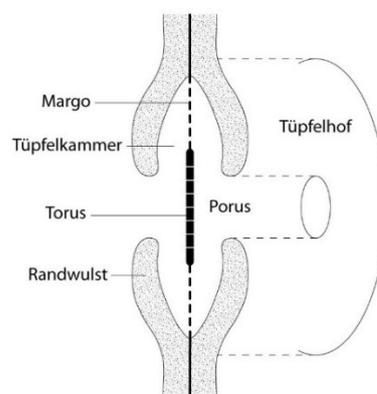


Abbildung 5: schematische Darstellung eines Hoftüpfels zwischen zwei Tracheiden (Rosenthal et al. 2010)

Es entsteht ein komplexes Leitungssystem aus einer Vielzahl an verbundenen Holzzellen. Über dieses System erfolgt der Transport von Wasser und Nährsalzen. Während der Kernholzbildung und der Trocknung von Holz kommt es jedoch zu Tüpfelverschluss (Abbildung 12).

Als hygroskopischer Stoff steht Holz in Wechselwirkung mit dem Wasser seiner Umgebung. Die Holzfeuchte passt sich dem Umgebungsklima an, es stellt sich eine Gleichgewichtsfeuchte abhängig vor allem von Luftfeuchtigkeit ein. Wasser kann sich sowohl in den mikroskopischen als auch in den makroskopischen Poren (Lumina) einlagern. Der von der Rohdichte abhängige makroskopische Porenanteil beträgt durchschnittlich 50 bis 60 %.

Abhängig vom Wassergehalt des Holzkörpers gibt es laut Niemz (1993) drei Grenzzustände (Abbildung 6):

- Darrtrocken: Es ist kein Wasser im Holz vorhanden. Der Holzkörper ist völlig trocken.
- Fasersättigungsbereich: Unterhalb dieses Bereiches wird Wasser innerhalb der Zellwände an diese gebunden. Man bezeichnet dieses eingelagerte Wasser als „gebundenes“ Wasser. Damit einher gehen Dimensionsänderungen, die als Quellen (Wasseraufnahme oder Adsorption) oder Schwinden (Wasserabgabe oder Desorption) bezeichnet werden. Oberhalb des Fasersättigungsbereiches wird Wasser zusätzlich innerhalb der Poren (Lumina) als „freies“ Wasser eingelagert. Eine Aufnahme dieses „freien“ Wassers ist nicht mit einer Dimensionsänderung verbunden. Der Fasersättigungsbereich ist u.a. von der Holzart abhängig und liegt in etwa bei 30 % Holzfeuchte.
- Wassersättigung: Sowohl das Mikro- (Zellwand) als auch das Makrosystem (Lumina) sind vollkommen mit Wasser gefüllt. Dieser maximale Feuchtegehalt ist abhängig von der Rohdichte.

Die Wasseraufnahme und Wasserabgabe von Holz unterteilt sich in vier Phasen, die sich hinsichtlich der Bindungsform zwischen Holz und Wasser unterscheiden (Abbildung 6):

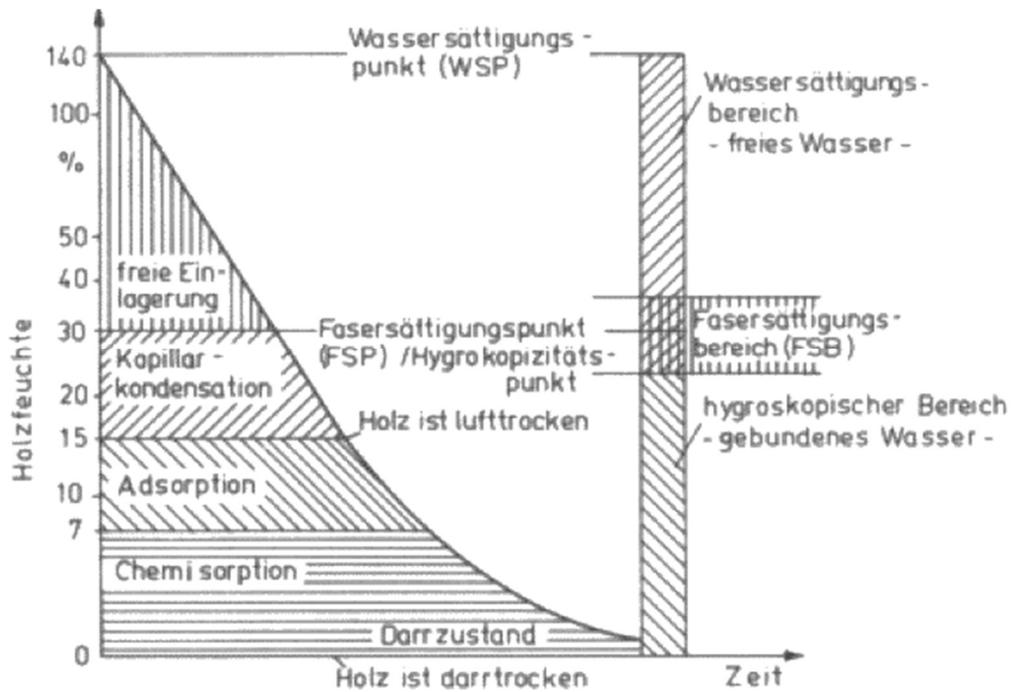


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bindungsformen von Wasser und Holz (Niemz 1993)

Chemisorption findet bei einer Holzfeuchte von 0 bis 6 % statt. Wassermoleküle werden über Wasserstoffbrücken an die amorphen Bereiche der Celluloseketten in der Zellwand gebunden und lagern sich zwischen diesen Ketten ein. Es entsteht eine monomolekulare Wasserschicht an der Oberfläche. Adsorption erfolgt in einem Feuchtefenster zwischen 6 % und 15 % Holzfeuchte. In dieser Phase bewirken elektrostatische und van-der-Waals Kräfte die Bindung weiterer Wassermoleküle in das mikroskopische Porensystem. Aus der monomolekularen Schicht entwickelt sich eine polymolekulare Schicht. Als Kapillarkondensation (15 %- 30 % Holzfeuchte) bezeichnet man das Kondensieren von Flüssigkeiten in engen Röhren (Kapillaren). Bei sehr geringem Radius dieser Kapillaren sinkt der Sättigungsdampfdruck, Wasserdampf kondensiert innerhalb dieser Kapillare und setzt sich als Wasser an der Oberfläche der Kapillare ab. Das Wasser lagert sich zwischen den Celluloseketten ein. Bei Fasersättigung kann das Holz auf diesem Weg kein Wasser mehr zu sich nehmen. Es lagert sich danach als freies Wasser in den makroskopischen Poren ab (Niemz 1993).

Unterhalb der Fasersättigung sind die Wassermoleküle stärker an den Holzkörper gebunden und das Holz trocknet durch Desorption, d. h. durch das Loslösen eines löslichen Stoffes von einem Feststoff, ab. Die Trocknungsgeschwindigkeit verlangsamt sich ab dieser Holzfeuchte aufgrund der stärkeren Bindungskräfte zwischen Holzkörper und Wasser. Oberhalb der Fasersättigung ist das Wasser nicht an den Holzkörper gebunden und es

verdunstet während der Trocknung als freies Wasser aus den Kapillaren. Bei der Trocknung als Schnittholz führen die Transportwege des Wassers jedoch über die Zellwände (inkl. Tüpfel) hinweg (siehe 1.2) was des Trocknungsprozess „quer zu Faser“ gegenüber der Trocknung in der Längsrichtung des Holzes sehr hemmt.

Bis zur Fasersättigung geht mit der Wasseraufnahme und -abgabe auch eine Dimensionsänderung einher (Quellen bzw. Schwinden). Als anisotropes Material unterscheiden sich diese Größen wie fast alle physikalischen Eigenschaften abhängig von der anatomischen Hauptrichtung. Diese Unterschiede ergeben sich daraus, dass während der Ad- und Desportion die Wassermoleküle zwischen den Celluloseketten einlagern. Da die Celluloseketten eine starke Längsorientierung aufweisen, ist die Dimensionsänderung in dieser Richtung am geringsten. Durch dieses Phänomen und das Trocknungsgefälle entstehen während der Trocknung von Holz innere Spannungen. Sie führen zu den bekannten Problemen der Holz Trocknung, wie Verformung oder Rissbildung (Trübswetter 2009; Niemz 1993).

2.2. Holz Trocknung

Laut Teischinger (2012) ist das Ziel der Holz Trocknung, „den Feuchtegehalt des Holzes auf bestimmte Zielvorgaben zu reduzieren bzw. einzustellen.“ Die Zielfeuchte entspricht üblicherweise der Gebrauchsfeuchte, um die Maßhaltigkeit des Produkts zu gewährleisten. Das Holz soll somit auf jene Feuchte getrocknet werden, die der Gleichgewichtsfeuchte im späteren Einsatzgebiet entspricht. Die Gebrauchsfeuchte schwankt abhängig von der Jahreszeit, dem Ort des Einsatzes und der Holzart. Daneben ergeben sich durch Trocknung geringere Transportkosten durch den Gewichtsverlust und es wird gegen eine Verfärbung des Holzes sowie gegen Pilzbefall vorgegangen. Wird das Holz weiterverarbeitet (Hobeln, Verkleben, Oberflächenbehandlung), muss das Holz laut geltenden Normen ebenfalls getrocknet werden (Trübswetter 2009).

Physikalisch ist das Abführen der Feuchtigkeit Thematik der Holz Trocknung. Dieser Stofftransport steht in enger Verbindung mit dem Wärmetransport. Der Dampfdruck, der die treibende Kraft des Stofftransports darstellt, ist eine Funktion der Temperatur. Daraus ergibt sich eine enge Verbindung zwischen Wärme- und Stofftransport (Teischinger 2012).

Als Konvektion bezeichnet man das physikalische Mitführen von Energie in einer Strömung. Bei konvektiver Holz Trocknung handelt es sich somit um Trocknung mit Dampf-Luft-Gemischen. Wärme wird von der Luft aufgenommen und dem Holz zugeführt. Es entsteht ein Wärmeübergang. Zur gleichen Zeit nimmt die Luft

die aus dem Holz austretende Feuchte auf und führt diese als Dampf ab (Abbildung 8). Die Menge des abgeführten Dampfes ist begrenzt und hängt von der Temperatur ab. Das heißt, mit steigender Temperatur der Luft (eig. des Dampf-Luft-Gemisches) lässt sich mehr Wasserdampf in dieser aufnehmen (Trübswetter 2009). Es benötigt jedoch einen ständigen Austausch der Luft, um trockene Luft für eine weitere Wasseraufnahme zur Verfügung zu stellen. Die Luftströmung oberhalb der Holzoberfläche kann zwei Formen annehmen (Abbildung 7). Laminare Strömung läuft parallel zur Oberfläche. Die Luftgeschwindigkeit verringert sich in Richtung der Holzoberfläche. Es entsteht eine große Grenzschicht. Ein Luftaustausch innerhalb der Grenzschicht findet nur bedingt statt. Nach einer gewissen Strecke stellt sich eine turbulente Strömung ein. Durch die Reynoldszahl lassen sich die Strömungszustände charakterisieren. Steigt die Reynoldszahl oberhalb Holzoberfläche über 20 000, so stellt sich eine turbulente Strömung ein. Die Grenzschicht wird dünner, es findet ein größerer Luftaustausch statt. Die Trocknungsbedingungen werden dadurch verbessert, da die Feuchtigkeit schneller vom Holz abgeführt wird. Für turbulente Strömung und somit gute Trocknungsbedingungen ist vor allem eine ausreichend große Luftgeschwindigkeit von Bedeutung (Siau 1984; Steiner 2008).

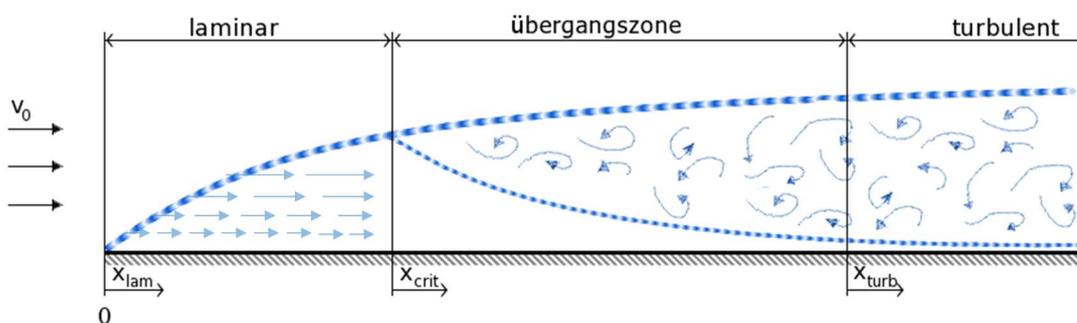


Abbildung 7: Laminare und turbulente Strömung über einer ebenen Fläche. Die gestrichelte Linie stellt die Grenzschicht dar (Mandavi 2006).

Die konvektive Holz Trocknung bei niedriger Temperatur lässt sich laut Perré (1999) in zwei grobe Phasen einteilen. Während der ersten Phase (Abbildung 8) ist die Holzfeuchte der Grenzschicht noch oberhalb des Fasersättigungsbereiches. Im Verlauf dieser Phase ist die Trocknungsrate konstant und hängt allein von den äußeren Bedingungen des Luftstroms, nämlich Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Geschwindigkeit, ab. Die Temperatur des Holzes übersteigt die Kühlgrenztemperatur nicht. Laut Steiner (2008) hat die

Luftgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf den Trocknungsverlauf in dieser Phase. Je höher die Holzfeuchte, desto größer ist auch der Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Die erste Phase dauert so lange wie die Grenzschicht über Kapillarkräfte mit Wasser aus dem Holzkörper versorgt wird.

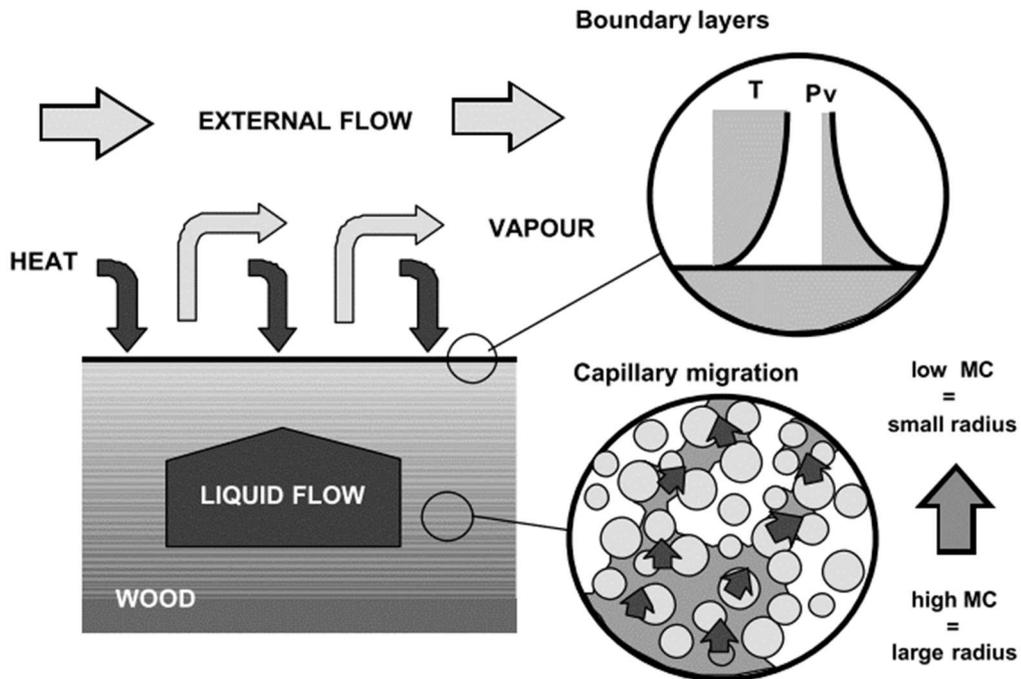


Abbildung 8: Erste Trocknungsphase: Das Wasser wandert im Medium durch Kapillarkräfte an die Oberfläche. Dort verdunstet das Wasser und wird als Dampf vom Dampf-Luft-Strom abgeführt (Perré 1999).

Kapillarkräfte bewirken den Transport von freiem Wasser aus dem Inneren an die Oberfläche innerhalb des Zellsystems. Die Strömung einer Flüssigkeit entlang eines Gradienten durch ein poröses Medium wird durch das Gesetz von Darcy beschrieben:

$$\dot{v} = \frac{K}{\eta} * \frac{\Delta p}{L}$$

- \dot{v} ... Volumenstrom [m^3/s]
- K ... Konstante (Permeabilität)
- η ... dynamische Viskosität [Pas]
- Δp ... Druckgradient [Pa]
- L ... Länge [m]

Die Kapillarspannung ist abhängig vom Radius der Kapillare. Je kleiner der Radius, desto größer die daraus resultierende Spannung. Während der

Trocknung fließt Wasser aufgrund der Kapillarspannung von Tracheiden mit großem Radius hin zu angrenzenden Tracheiden mit kleinerem Radius (Krischer 1978). Die Kapillarkräfte entstehen aufgrund Oberflächenspannungen an der konkaven Oberfläche (Meniskus) innerhalb einer Kapillare zwischen der Flüssigkeit und dem Gas (Abbildung 9-a). Die Intensität der Oberflächenspannung hängt vom Radius der Krümmung des Meniskus ab. Je größer der Radius desto kleiner die Oberflächenspannung. Während der Trocknung einer Kapillare ändert sich dieser Radius. Abbildung 9-a bis Abbildung 9-d zeigen den Vorgang der Trocknung einer einzelnen Kapillare. An der Oberfläche des Meniskus verdunstet Wasser und geht als Wasserdampf in die Luft über (Abbildung 9-b). Der Meniskus dringt in die Kapillare ein, dabei verkleinert sich der Radius r_i . Die Kapillarspannung vergrößert sich dadurch (Abbildung 9-c). Weitere Verdunstung vergrößert den Radius r_i wiederum und resultiert in kleiner Kapillarspannung (Abbildung 9-d).

Abbildung 9-e bis Abbildung 9-l zeigen das Abtrocknen von freiem Wasser aus dem Holz. Die Lumen sind zu Beginn mit Wasser gefüllt, mit Ausnahme von Luftblasen unterschiedlicher Größe. Das Wasser verdunstet an der Oberfläche und wird als Dampf abgeführt. Die Kapillarspannung ist aufgrund der großen Radien noch relativ gering. Mit Voranschreiten der Trocknung wandert die Verdunstungsoberfläche in die Tüpfel (Abbildung 9-f). Der Radius verkleinert sich, dadurch erhöht sich die Kapillarspannung im gesamten Zellsystem. Das bewirkt ein Erweitern der größeren Luftblase. Die Oberflächenspannung um die Luftblase ist kleiner, dadurch dehnt sich diese aus. Das Wasser wandert über die angrenzenden Zellen hin zur Verdunstungsoberfläche (Abbildung 9-h). Danach erweitert sich die kleinere Luftblase aufgrund der Kapillarspannung (Abbildung 9-i). Das Wasser wandert über Tüpfel zu den angrenzenden Zellen und verdampft an der Oberfläche. (Abbildung 9-j). Da keine weiteren Blasen mehr zur Entlastung beitragen, kann sich die Kapillarspannung nochmal erhöhen. Die Verdunstungsoberfläche tritt nun in die Zelle ein wodurch es zu einer Reduktion der Spannung kommt (Abbildung 9-k). Das Wasser verdunstet weiter und wandert als Dampf ab (Abbildung 9-l). Tiefergelegene Holzzellen verlieren auf ähnliche Weise ihr freies Wasser. Die Kapillarkräfte innerhalb des Systems können jedoch so groß sein, dass es zu einem Zellkollaps kommt (Abbildung 9-m/n) (Siau 1984).

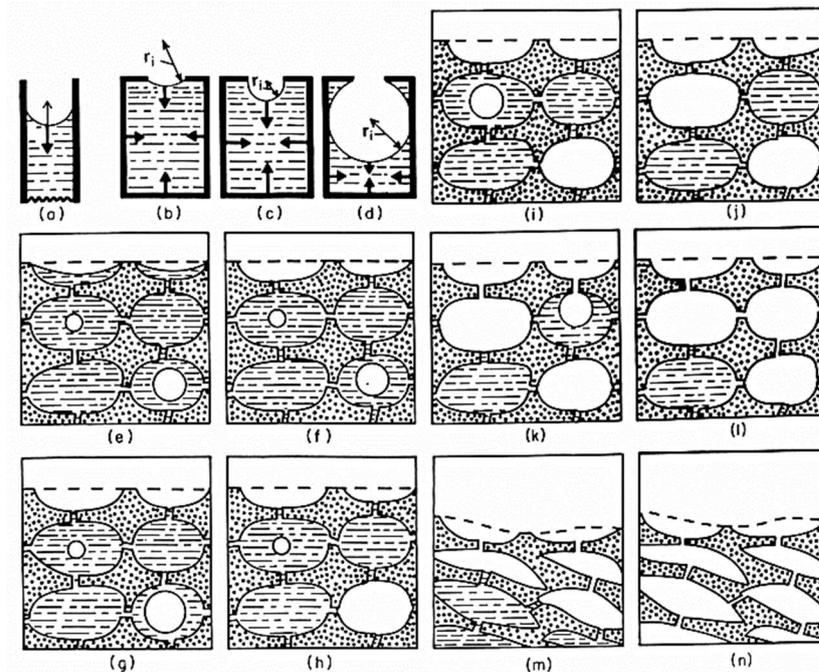


Abbildung 9: Darstellung der Verdunstung von Wasser aus einer Kapillare (a bis d) und der Verdunstung von freiem Wasser aus dem Holzkörper (e bis n) (Siau 1984)

Erreicht die Oberfläche den hygroscopischen Bereich, geht die Trocknung in die zweite Phase über (Abb. 10). Im hygroscopischen Bereich unterhalb der Fasersättigung findet der Transport des gebundenen Wassers vor allem über Diffusion statt. Diese geht läuft deutlich langsamer ab als der Kapillartransport von freiem Wasser. Deshalb verringert sich die Trocknungsgeschwindigkeit in dieser Phase deutlich. Als Diffusion bezeichnet man den Transport von Teilchen durch einen Festkörper, Gas oder Flüssigkeit. Das Wasser diffundiert als Dampf innerhalb der Zelllumen und Tüpfel und als gebundenes Wasser innerhalb der Zellwand. Der Transport läuft in Richtung eines Konzentrationsgradienten ab. Die Diffusion kann durch das erste Fick'sche Gesetz beschrieben werden:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

J ... Teilchenstromdichte [$\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]

D ... Diffusionskoeffizient [m^2/s]

$\frac{\partial c}{\partial x}$... Konzentrationsgradient [mol/m^4]

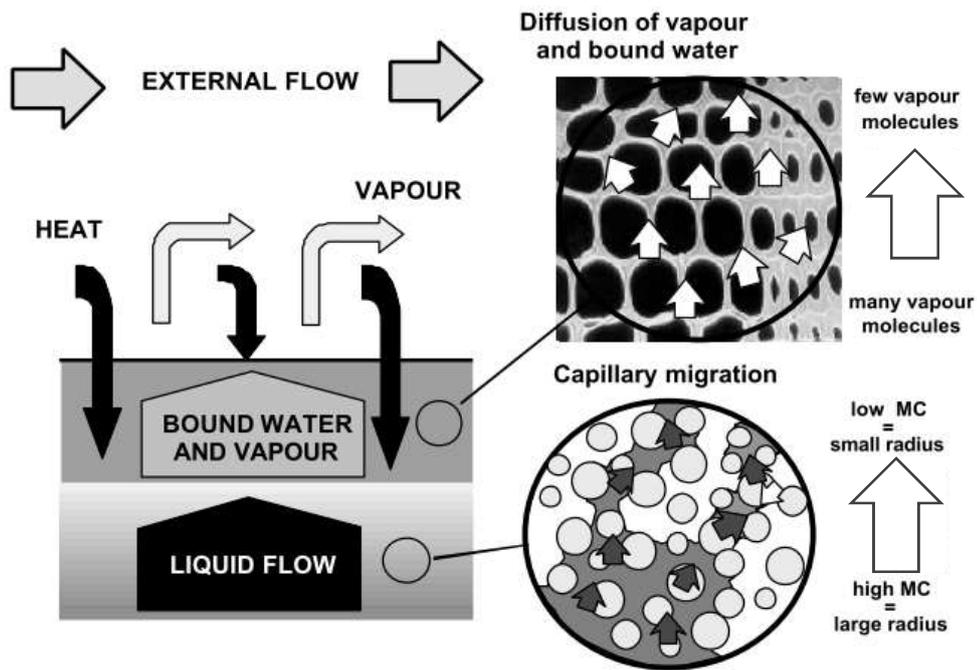


Abbildung 10: Zweite Trocknungsphase: Aus der Grenzfläche entsteht ein Bereich im hygroskopischen Bereich. In diesem Bereich wirken sowohl Dampfdiffusion als auch gebundene Wasserdiffusion. Die Verdunstung findet teilweise im Medium statt. Infolgedessen muss ein Wärmefluss zu dem inneren Teil des Körpers durch Leitung gewährleistet sein (Perré 1999).

Dampfdiffusion entsteht aufgrund unterschiedlicher Gradienten des Dampf- und Gesamtdrucks. Dabei wird Wasserdampf durch die Lumen und Tüpfel transportiert. Vor allem bei Trocknung mit hoher Temperatur spielt der Wasserdampftransport eine große Rolle. Die Diffusion durch die Zellwand schreitet wesentlich langsamer als die Dampfdiffusion voran. Wassermoleküle sind über Wasserstoffbrücken an die polaren Hydroxylgruppen der Zellwand gebunden. Abhängig von der Holzfeuchte handelt es sich um eine monomolekulare oder polymolekulare Schicht. Überschreitet die kinetische Energie eine gewisse Schwelle (Aktivierungsenergie E_a), können die Moleküle sich entlang eines Gradienten bewegen oder bei noch höherer Energie sogar aus dem Holz verdampfen. Die Aktivierungsenergie E_a ist von der Holzfeuchte abhängig. Je höher die Holzfeuchte desto geringer die Aktivierungsenergie E_a . Dadurch wird die Richtung des Feuchtetransports vorgegeben (Skaar 1988). Dieser Vorgang steht in enger Verbindung mit der Temperatur, wie die Arrhenius-Gleichung zeigt:

$$D = A * e^{\frac{-E_a}{R*T}}$$

D ... Diffusionskoeffizient [m^2/s] A ... Konstante
 E_a ... Aktivierungsenergie [J/mol] R ... allg. Gaskonstante [$J/molK$]
 T ... Temperatur [K]

Abhängig ob die Diffusion von gebundenem Wasser oder Wasserdampf vorherrscht, ergeben sich daher unterschiedliche Diffusionskoeffizienten und -geschwindigkeiten. Die Diffusion läuft auch in die anatomischen Hauptrichtungen unterschiedlich schnell ab. Laut Fotsing & Tchagang (2005) ist der Diffusionskoeffizient in longitudinaler Richtung 10 bis 15-mal größer als in transversaler Richtung. In tangentialer Richtung ist der Diffusionskoeffizient von Holz am kleinsten.

Nach Kang et al. (2008) kann der Feuchtetransport in tangentialer Richtung auf vier unterschiedlich Pfaden erfolgen, abhängig davon welcher Transportmechanismus beteiligt ist (Abbildung 11). Die Diffusion von gebundenem Wasser wird durch die Pfade T1 (Radialwand) und T4 (Tangentialwand) beschrieben. T3 zeigt die Diffusion durch Tüpfel, T2 die Dampfdiffusion durch das Lumen.

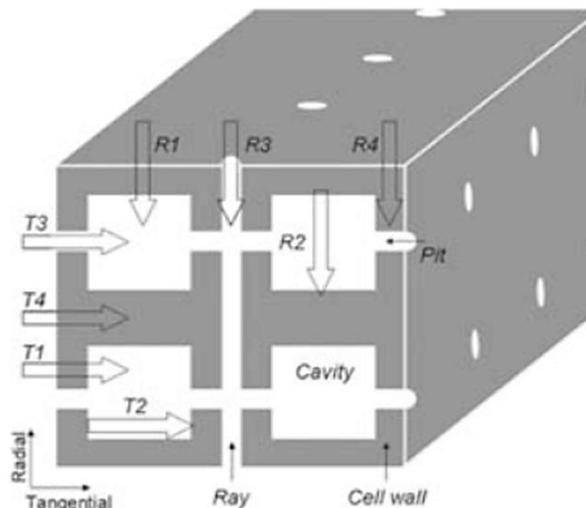


Abbildung 11: Arten der Wasserstoffdiffusion durch eine Zelle (Kang et al. 2008)

Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt im Laufe dieser Phase immer mehr ab, da mit fortdauernder Trocknung das Wasser immer stärker an das Holz gebunden ist. Es wird eine höhere Aktivierungsenergie E_a zum Loslösen des Wassers von der Zellwand benötigt (Perré 1999).

Bei Übergang zum hygrokopischen Bereich kann es zu Tüpfelverschluss kommen (Abbildung 12). Durch Kapillarkräfte legt sich der Porus an den Randwulst an und verschließt den Tüpfel. Der Wassertransport durch den Holzkörper wird dadurch limitiert (Braun 1998; Rosenthal et al. 2010).

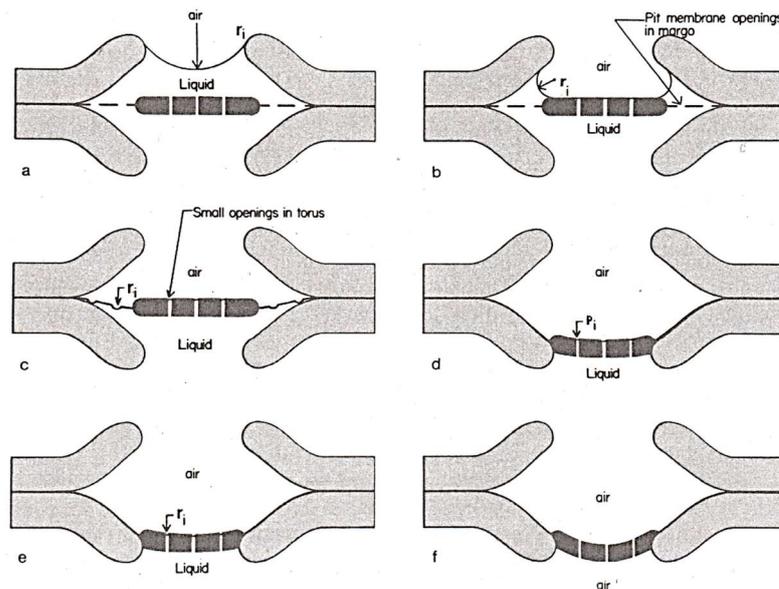


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Tüpfelverschlusses. a) Meniskus im Tüpfel; b) ringförmiger Meniskus zwischen Zellwand und Torus; c) Menisken zwischen Öffnungen des Margo; d) verschlossener Tüpfel; e) Torus legt sich aufgrund der entstehenden Kapillarkraft ganz an Zellwand an; f) komplett geschlossener Tüpfel (Siau 1984)

2.3. Verklebung

Ganz allgemein wird die Festigkeit einer Verklebung neben einer ausreichenden Kohäsion durch zwei wesentliche Aspekte gewährleistet. Einerseits durch die Adhäsion zwischen der Oberfläche der Fügeiteile und des Bindemittels, andererseits durch die Verteilung der eingebrachten Energie, um Spannungsspitzen zu vermeiden (Dunky & Niemz 2002).

Eine gute Adhäsion ergibt sich laut Dunky & Niemz (2002) aus folgenden Faktoren:

- Diffusion
- elektrostatische Kräfte
- Absorption
- mechanische Adhäsion
- chemische Verbindung

Moleküle des Bindemittels und der Füge­teile diffundieren durch die Grenzschicht. Jedoch nicht jedes Polymer der Holzsub­stanz, wie zum Beispiel der kristalline Teil der Cellulose, lassen Diffusion zu. Daneben bilden sich durch unterschiedliche Ladung elektrostatische Kräfte zwischen Bindemittel und Füge­teil. Durch Absorption entstehen intramolekulare und -atomare Kräfte. Diese Kräfte setzen sich aus primären (Ionen-, Atom- oder Metallbindung) und sekundären Kräften (van-der-Waals-Kräfte, Wasserstoffbrücken und elektrostatische Kräfte) zusammen. Die mechanische Adhäsion spielt in der Holzverklebung eine große Rolle. Innerhalb der Interphase (Abbildung 13) entstehen durch Verästelungen des Bindemittels innerhalb der Holzporen mechanische Verankerungen in Form von formschlüssigen Verbindungen. Es können sich auch atomare Verbindungen zwischen dem Bindemittel und dem Holz bilden. Eine Voraussetzung für diese Verbindung ist eine Reaktion zwischen den Molekülen des Bindemittels und der Holzoberfläche, die dadurch modifiziert wird.

Um die Holzverklebung zu beschreiben, vergleichen Horioka (1968) und Marra (1992) die Verklebung mit einer Kette. Die Verklebung ist so stark wie das schwächste Glied der Kette. Das Modell von Marra (1992) ist in Abbildung 13 schematisch und in einer fluoreszenzmikroskopischen Abbildung dargestellt. Die Kette besteht aus neun Kettengliedern. Diese setzen sich aus Klebstoff (1), der Klebstoff Interphase (2,3), der Grenzfläche zwischen Kleber und Holzoberfläche, auch als Interface bezeichnet (4,5), und dem Holzkörper (8,9) zusammen. Die gesamte Verbindung ist nur so stark wie das schwächste Glied dieser Kette.

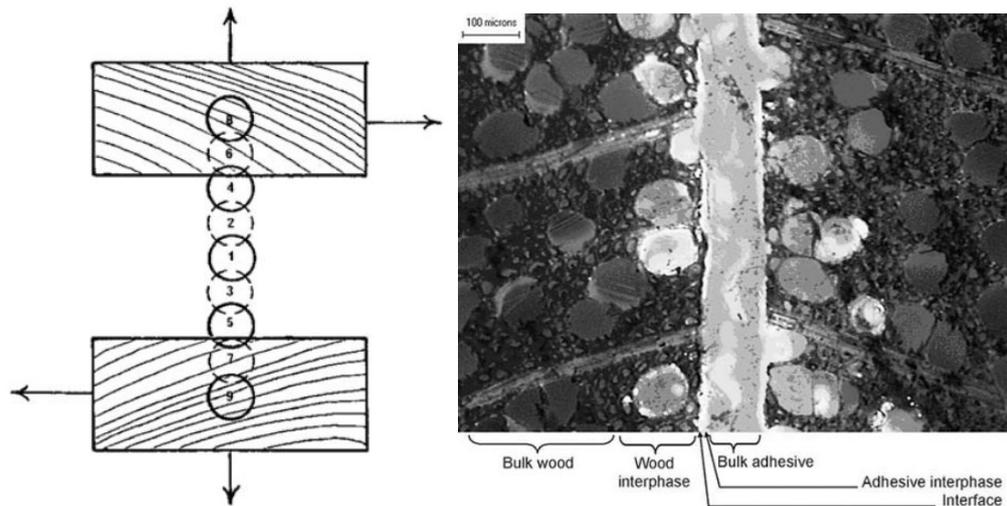


Abbildung 13: Marras Modell schematisch (links) (Marra 1992) und in einer fluoreszenzmikroskopischen Darstellung einer Verklebung mit einem Epoxyharz (Frihart 2005)

Holz zeichnet sich durch hohe Porosität, einer höheren Oberflächenrauigkeit, unterschiedlicher chemischer Polymerzusammensetzung und großer Variabilität aus. Durch die Porosität der Holzstruktur ist eine deutlich größere Oberfläche für die Verklebung vorhanden. Die Lumen bieten eine große Oberfläche für die Bindung zwischen Kleber und Holz. Die Porosität des Holzes kann zu einer mechanischen Verzahnung des Klebers mit dem Holz führen. Allerdings führt eine zu große Porosität, die vor allem bei Laubhölzern vorkommt, zu einer starken Penetration und somit zu einer verhungerten Leimfuge. Außerdem ist Holz aus verschiedenen Strukturelementen (Cellulose, Hemicellulose, Lignin) aufgebaut. Jedes dieser Polymere hat andere chemischen Eigenschaften und daher auch andere Wechselwirkungen mit Wasser und Klebstoff (Frihart 2005).

2.4. Feuchteverteilung im Stammquerschnitt und Überlegungen zur Oberflächenabtrocknung

Die Feuchteverteilung im Stammquerschnitt von Nadelholz ist relativ konstant und in der Literatur gut dokumentiert (Trendelenburg & Mayer-Wegelin 1955; Knigge & Schulz 1966; Sell et al. 1987; Böhner et al. 1993).

Hirmke (1999) bestimmt die größte Holzfeuchte in Fichtenstämmen bei den jüngsten und somit äußersten Jahrringen. Hier befindet sich das physiologisch aktive Splintholz, dass für die Wasser- und Nährsalzleitung verantwortlich ist (Abbildung 3). Dabei liegt die Feuchte im Kernholz (Reifholz) im Durchschnitt bei etwa 35% und im Splintholz stark schwankend zwischen 80 und 180%.

Hansmann (2007) zeigt, dass die Holzfeuchte von Splintholz, zwischen 80 % und 140 % liegt. Die Holzfeuchte kann jedoch auch 30 % oder 200 % betragen.

Zur oberflächennahen Abtrocknung von Schnittholzoberflächen nach Abb... seien folgende Überlegungen angestellt (primär bezogen auf Splintholz):

Der gesamte Holzquerschnitt ist mit Feuchtigkeit weitgehend abgesättigt und zwar vollkommene Sättigung der Zellwände (gebundene Feuchtigkeit) und volle bzw. teilweise Füllung der Lumina mit freiem Wasser.

Beim Abtrocknungsvorgang kann die Feuchtigkeit zwar grundsätzlich entlang aller drei anatomischer Richtungen entweichen (längs – radial – tangential). Durch die Dimension des Brettes ist aber die Längsrichtung nicht relevant, der wirksame Feuchteentzug erfolgt nur quer zu Faserrichtung, je nach Jahrringlage eher radial oder tangential (in Abbildung 14 radial dargestellt).

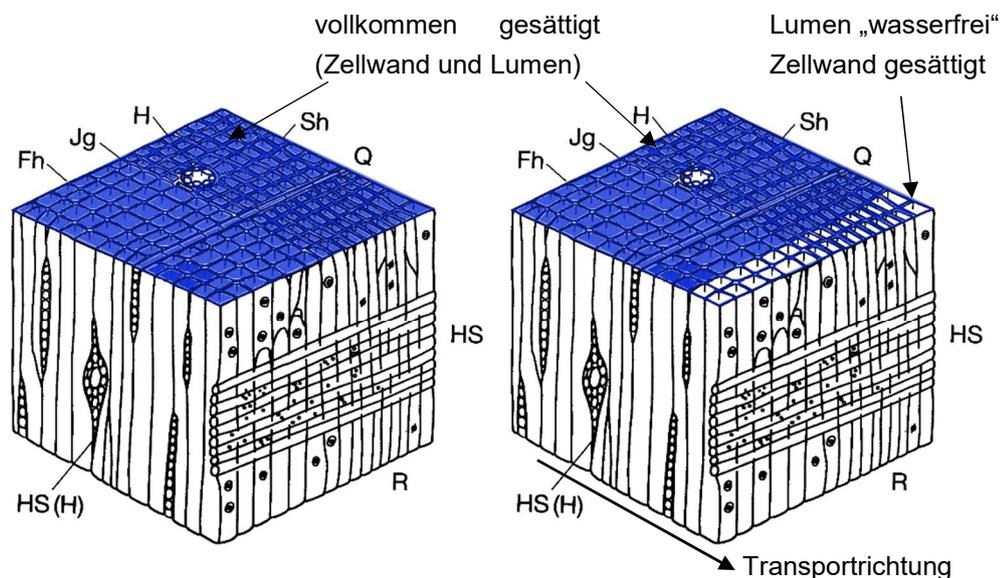


Abbildung 14: Mikrostruktur eines Holzquerschnittes mit Darstellung völliger Feuchtesättigung (links) und Abtrocknung einer kleinen Randschicht von etwa zwei bis drei Zellreihen (rechts). Fh – Frühholztracheiden, Sh – Spätholztracheiden, Jg – Jahrringgrenze, HS – Holzstrahl, H – Harzkanal, HS(H) – harzgangführender Holzstrahl, Q – Querschnitt, T – Tangentialschnitt, R – Radialschnitt (Wagenführ 1999)

Bei der Abtrocknung in der Querrichtung muss auch das „freie Wasser“ aus den tiefer liegenden Lumina über die Zellwände diffundieren und/oder über Tüpfel sowie gegebenenfalls entlang der Holzstrahlen entweichen. Entsprechende praxisrelevante Modelle, wie dieser Vorgang wirklich vor sich geht, ist in der Literatur kaum nachvollziehbar.

Als Hypothese für den Vorgang einer Naßverklebung gilt (besprochen im Projektkonsortium mit Hr. DI M. Hirmke/Stora Enso), dass die Abtrocknung der Randschicht von einigen Zellreihen unterhalb des Fasersättigungsbereiches schneller vor sich gehen muss, als Feuchte von tiefer liegenden Zellreihen nachstoßen kann, um nach der oberflächlichen Abtrocknung einen Feuchtezustand um bzw. unterhalb des Fasersättigungsbereiches von ca. 30% für die Zeit des Auftrags und der Aushärtung des Klebstoffes zu gewährleisten.

2.5. Nassverklebung

Die Nassverklebung, im Englischen oft als „green glueing“ bezeichnet, wird als „Verklebung von ungetrocknetem Holz, das in der Regel eine Holzfeuchte über dem Fasersättigungspunkt aufweist“, definiert. Zudem handelt es sich auch „um eine Verklebung bei unbekannter oder schwankender Holzfeuchte“, die vor allem sägefrisches Holz aufweist. Das heißt, dass freies Wasser in den Lumina vorhanden ist (Maun 2008).

Auf dem Weg zur höheren Wertschöpfung innerhalb der Massivholzprozesskette kann die Naßverklebung einen großen Beitrag leisten. Schon früh wurde das Potential von nassverklebtem Holz erkannt (Currier 1960) und eine mögliche Realisierung von Strickler (1970) dargelegt. Im Gegensatz zum historisch gewachsenen konventionell Prozess werden bei der Naßverklebung unerwünschte Teile am Anfang aus der Prozesskette entfernt (Abbildung 15). Danach wird das Holz im sägefrischen Zustand verklebt und das vorgefertigte Produkt getrocknet. Dadurch wird die Trocknungskapazität optimal ausgenutzt. Das bewirkt eine Zunahme der Volumenausbeute und infolgedessen der Wertschöpfung (Abbildung 15).

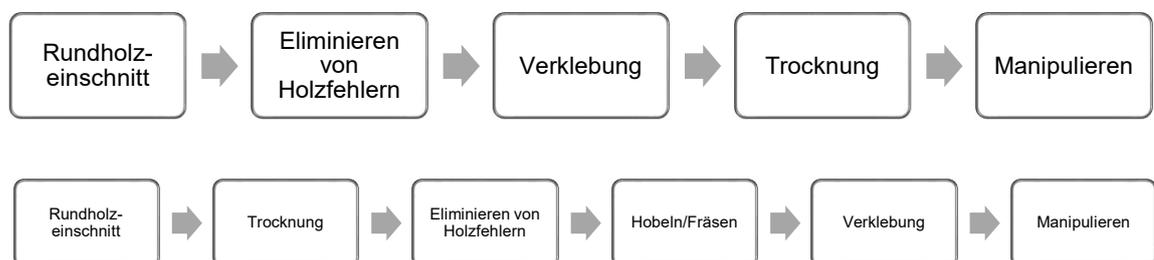


Abbildung 15: Vereinfachtes Flussdiagramm des Nassverklebungsprozesses (oben) und des konventionellen Verklebungsprozesses (unten)

Die verhungerte Leimfuge gilt als größte Gefahr der Nassverklebung. In einer verhungerten Leimfuge ist nicht genug Harz vorhanden, um die Füge­teile dauerhaft miteinander zu verbinden und ausreichend Kohäsion der Leimfuge zu

gewährleisten. Sie resultiert u.a. aus einer zu starken Penetration des Harzes in den Holzkörper. Das freie Wasser innerhalb der Lumen verdünnt das Harz während der Nassverklebung und trägt so zu einer stärkeren Penetration bei (Sterley 2012; Mantanis et al. 2011). Die Penetration des Harzes in den Holzkörper ist ein mitentscheidender Aspekt in der gesamten Holzverklebungstechnologie, nicht nur der Nassverklebung. Nach Kamke & Lee (2007) haben viele Faktoren Einfluss auf das Penetrationsverhalten eines Harzes. Diese Faktoren beziehen sich auf die Fluideigenschaften des Klebstoffs, anatomische Eigenschaften, die Permeabilität des Holzes und schließlich die Verarbeitungsbedingungen. Die optimale Penetrationstiefe ist jedoch auch bei der konventionellen Verklebung noch nicht bekannt.

Die Entwicklung von schnell und kalt aushärtenden Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harzen (PRF) (Tiedemann et al. 1973) gab der Naßverklebungstechnologie einen Aufschwung (Kreibich 1974; Pizzi & Roux 1978; Troughton & Chow 1980; Pizzi & Cameron 1984). Kaltaushärtende PRF-Harze zeichnen sich durch eine verminderte Beweglichkeit und eine rasche Zunahme der Molekülgröße während der Polymerisation aus. Dadurch verkürzt sich die Presszeit und es wird keine zusätzliche Wärme für die Aushärtung benötigt. Die verminderte Beweglichkeit sorgt für eine begrenzte Penetration, die bei der Nassverklebung von entscheidender Bedeutung ist. Mit der Einführung von kommerziell verfügbaren PRF-Systemen wie Greenweld oder Soybond in den 90er des letzten Jahrhunderts gelang es in Nordamerika und Neuseeland den Nassverklebungsprozess innerhalb der Industrie zu implementieren (Kreibich et al. 1998; Lipke 2005).

In den letzten drei Jahrzehnten wurden immer mehr Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffsysteme (1K-PUR) für die Holzverklebung entwickelt und zugelassen. Aufgrund des Aushärteverhalten von 1K-PUR erscheint dieser Klebstoff als geeignetes System für die Naßverklebung. Polyurethanklebstoffe benötigen Wasser zum Aushärten. Dabei reagieren die im 1K-PUR vorhandenen Isocyanate mit dem Wasser aus der Luft oder aus dem Holz. Im konventionellen Verklebungsprozess mit 1K-PUR werden die Füge-teile teilweise nochmals mit Wasser besprüht, um Wasser für die Aushärtung zur Verfügung zu stellen. Das benötigte Wasser ist bei der Verklebung von sägefrischen Holz bereits im Holz vorhanden. Die Benetzung von 1K-PUR wird durch die Anwesenheit von Wasser außerdem erhöht (Pommier & Elbez 2006). Lange et al. (2000) und Maun & Cooper (1999) zeigen, dass eine naßverklebte Keilzinkenverbindung mit Polyurethanklebstoff die Anforderungen tragende Holzbauteile erfüllen kann.

Vor allem in Kombination mit der Keilzinkenverbindung (Abbildung 16) bietet der Nassverklebungsprozess ökonomische Vorteile im Vergleich zum konventionellen Holzverklebungsprozess (Abbildung 15). Holz, das mit Hilfe von Keilzinkung zu Konstruktionsholz verklebt wird, erzielt höhere Preise als normales Schnittholz, da keilgezinkte Ware gleichmäßigere Festigkeitseigenschaften besitzt und weniger zum Verdrehen neigt (Kreibich et al. 1998).

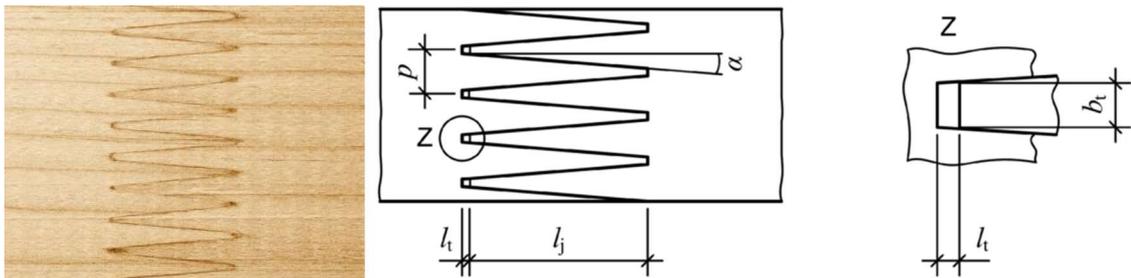


Abbildung 16: Typisches Profil einer Keilzinkenverbindung; l_j – Zinkenlänge, p – Zinkenteilung, α – Flankenkeigung, l_t – Zinkenspiel, b_t – Breite der Zinkenspitze (EN 14080)

Die größere Wertschöpfung der Nassverklebung in Kombination mit der Keilzinkenverbindung ergibt sich laut Sterley (2012) aus folgenden Punkten:

- es entstehen Bauteile von einheitlicher Länge für die Trocknung
- Holz, das unerwünschte Fehler und Äste aufweist, wird früh aus dem Prozess eliminiert
- kurze Stücke können zu Bauholz weiterverarbeitet werden
- Verlust bei finaler Manipulation wird reduziert
- keine Wärmezufuhr während der Verklebung

Durch einheitliche Bauteillängen werden sowohl die Kapazität der Trocknungskammer besser ausgenutzt als auch die Luftzirkulation innerhalb der Trocknungskammer optimiert. Holz, das Äste oder unerwünschte Fehler aufweist, wird früh aus der Prozesskette entfernt und erst gar nicht der Trocknung zugeführt. Kurze Stücke von guter Qualität können durch frühes Verbinden in den Prozess integriert werden. Dadurch steigt die Ausnutzung des Rohholzes. Der Verlust während der finalen Manipulation, wie z.B. Hobeln oder Kappen, wird deutlich reduziert, da unerwünschtes Holz bereits aus dem Prozess eliminiert wurde. Es kommt zu einer Energieersparnis, da keine Heizkosten für zusätzliche Wärme während des Aushärtens des Klebstoffes anfallen. Die bei der Nassverklebung verwendeten Harze polymerisieren rasch ohne Wärmezufuhr.

Die Nassverklebung ermöglicht daneben eine bessere Nutzung der Seitenware. Seitenware fällt zu rund 30 % in einem typischen europäischen Sägewerk an. Sie gilt v.a. aufgrund der geringen Dimensionen als minderwertige Ware, obwohl sie sehr gute Festigkeitseigenschaften besitzt. Eine nasse Verklebung ohne vorheriges Hobeln und Weiterverarbeiten zu einem hochwertigen Werkstoff für den konstruktiven Ingenieurbau kann die Ausnutzung und Wertschöpfung der Seitenwaren deutlich erhöhen (Serrano et al. 2010). Sterley et al. (2004) zeigen, dass eine dauerhafte vollflächige Verklebung von Splintholz möglich ist.

Die Naßverklebung ist jedoch zurzeit kein Gegenstand der bestehenden europäischen Normen, sowohl für tragende als auch für nicht-tragende Bauteile. Gemäß Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten (EC 5) müssen die Festigkeitseigenschaften von tragenden Bauteilen ermittelt und nachgewiesen werden. EC 5 verweist dabei auf EN 14080. Laut EN 14080 muss die Holzfeuchte der verklebten Teile innerhalb des vom Klebstoffherstellers angegebenen Bereich liegen. Das würde eine Nassverklebung ermöglichen, jedoch hat die Norm weitere Anforderungen an den Feuchtigkeitsgehalt. So muss das Holz eine Feuchte zwischen 6 % und 15 % zum Zeitpunkt der Verklebung aufweisen. Weiter darf der Unterschied der Holzfeuchte zwischen den Füge teilen 5 % nicht überschreiten. Diese Anforderungen unterbinden eine Nassverklebung gemäß EN 14080. Für nicht-tragende Anwendungen gibt es ebenfalls Restriktionen der Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Verklebung. So darf gemäß EN°13307-1 die Differenz der Holzfeuchte zwischen zwei Füge teilen nicht mehr als 2 % betragen. Diese Anforderung macht eine Nassverklebung geradezu unmöglich. Das Risiko einer verhungerten Leimfuge ist eine Erklärung für die Restriktionen bezüglich der Holzfeuchte (Källander & Leogrand 2008; Sterley 2012).

3. Material und Methode

3.1. Material

Für den Trocknungsversuch wurde sägefrische Seitenware aus Fichtenholz (*Picea abies* L Karst.) verwendet. Die Seitenware, bereitgestellt von der Partnerfirma, (grau in Abbildung 17) wurde sofort nach dem Einschnitt in Plastikfolie verpackt und tiefgefroren.

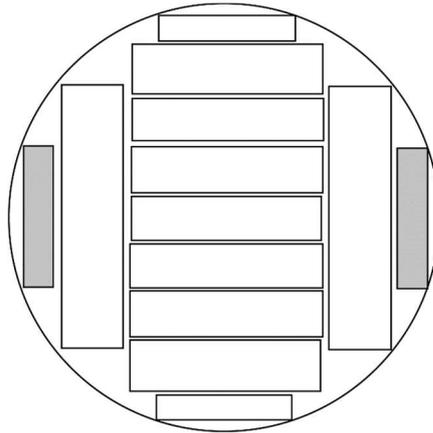


Abbildung 17: Schnittbild des Rundholzes, das für den Versuch verwendet wurde. Die Proben wurden aus der grau markierten Seitenware hergestellt.

Danach wurden sie im gefrorenen Zustand auf ihre endgültige Probengeometrie von 20 * 20 * 60 mm (R * T * L) zugeschnitten (Abbildung 18) und auf den Radialseiten gehobelt, um eine möglichst ebene Oberfläche und somit eine gleichmäßige Spandicke zu gewährleisten. Danach wurden die Proben wieder in Folie verpackt und tiefgefroren. Mindestens zwölf bis maximal 20 Stunden vor der Trocknung wurden die Proben bei Raumtemperatur gelagert, um ein Auftauen der Proben sicherzustellen.

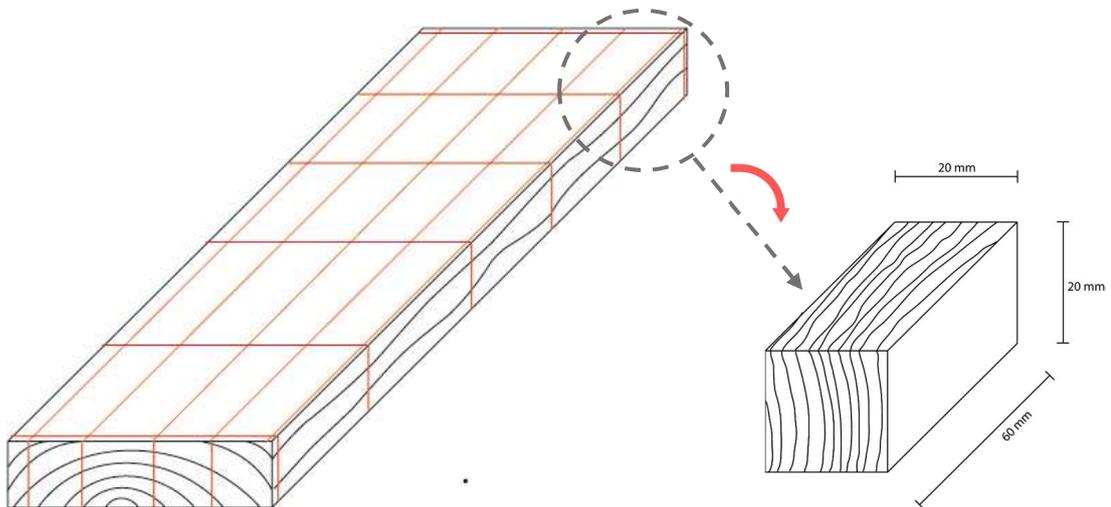


Abbildung 18: Vereinfachte Darstellung des Auftrennens der Bretter (links) in die endgültige Probengeometrie (rechts). Die roten Linien zeigen die Schnittfugen. Sofort nach dem Auftrennen wurden die Proben auf der Radialseite gehobelt.

Seitenware befindet sich den Randzonen des Holzzylinders. Hirmke (1999) bestimmt die größte Holzfeuchte in Fichtenstämmen bei den jüngsten und somit äußersten Jahrringen. Hier befindet sich das physiologisch aktive Splintholz, dass für die Wasser- und Nährsalzleitung verantwortlich ist (Abbildung 3). Hansmann (2007) zeigt, dass die Holzfeuchte von Splintholz, zwischen 80 % und 140 % liegt. Die Holzfeuchte kann jedoch auch 30 % oder 200 % betragen. Die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werte decken sich hiermit (Abbildung 19). Die mittlere Ausgangsfeuchte der Proben betrug 117 % bei einer Standardabweichung von 38 %.

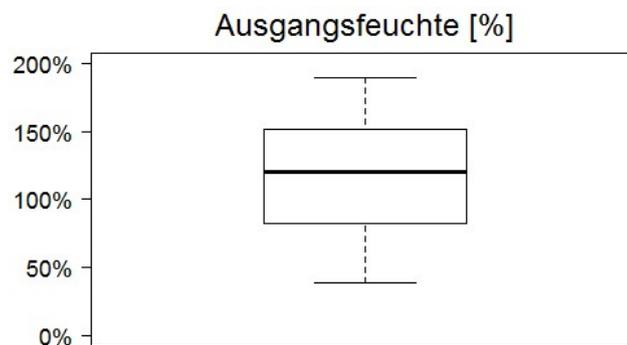


Abbildung 19: Ausgangsfeuchte dargestellt als Boxplot, n = 135

3.2. Methode

3.2.1. Trocknung

Die Trocknung erfolgte in einer eigens für den Laborversuch gebauten Vorrichtung nach Abb. 19 per Konvektion mit Hilfe von Heißluft. Als Heißluftquelle kam eine Heißluftpistole (Steinel HG 2310 LCD) mit einem Düsenfeldaufsatz zum Einsatz, der 3 cm über der Probe seine Öffnung hatte. Die gesamte Holzoberfläche wurde direkt von der Heißluft erfasst (Abbildung 20). Die Temperatur am Ausgang der Heißluftpistole und an der Holzoberfläche betrug 80°C bzw. 100° C. Die Luftgeschwindigkeit (ermittelt mit einem Anemometer: testo 245) betrug auf Höhe der Probenoberfläche 3,5 m/s.

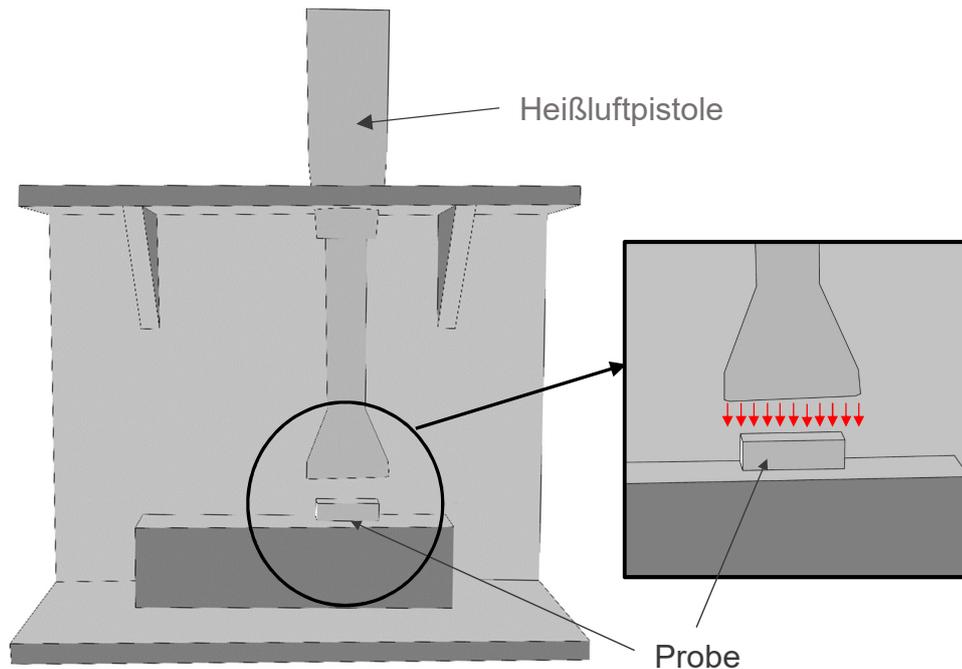


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Trocknung bzw. Belüftung über eine Heißluftpistole

3.2.2. Spanabnahme

Im Zuge der Verifizierung der Tiefe der Abtrocknung war es nötig, möglichst dünne Späne von der angetrockneten Holzoberfläche abzutragen, um mit der Darmmethode am einzelnen Span den Feuchtegradienten am Probestück zu ermitteln.

Für die Spanabnahme kam eine modifizierte Raubank zum Einsatz (Abbildung 21), die grundsätzlich schon in früheren Versuchen am Institut zum Einsatz kam. Die Modifikation besteht aus einer Führungsschiene mit einer Öffnung für die Probe. Durch die Führungsschiene kommt es zu einer kontrollierten Schnittbewegung und einer konstanten Spandicke.



Abbildung 21: Für die Spanabnahme modifizierte Raubank

Die angestrebte Dicke eines abgenommenen Spans entspricht der zukünftigen Interphase der Verklebung. Bei Polyurethanklebstoffen beträgt die Penetrationstiefe in etwa fünf Zellreihen. Bei einem durchschnittlichen Zelldurchmesser von 30 μm ergibt sich daraus die Zielspandicke von 150 μm (Haß 2012; Fengel & Wegener 1984). Abbildung 22 zeigt die Spandicke aller Proben, bei 80 °C und bei 100 °C als Boxplot.

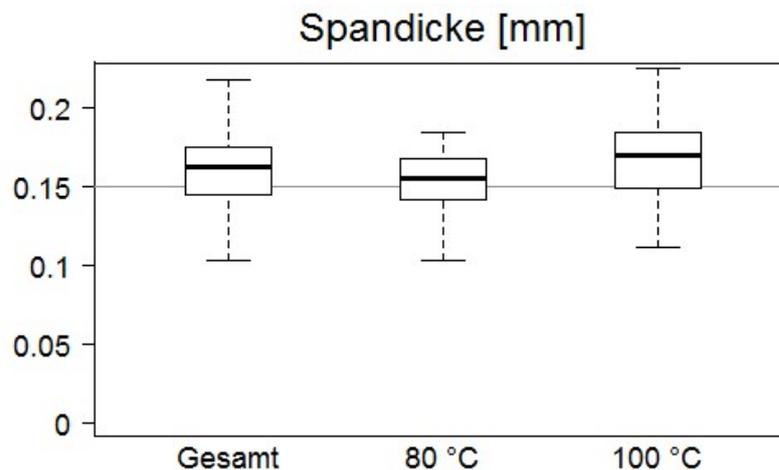


Abbildung 22: Boxplot für die Spandicke. Die graue Linie stellt die Zieldicke dar.

3.2.3. Feuchtebestimmung

Die Holzfeuchte wurde zu den in Tabelle 1 dargestellten Zeitpunkten bestimmt. Vor jedem Trocknungsvorgang wurden zwei bis drei Späne abgehoben. Der zuletzt abgehobene Span wurde herangezogen, um die Ausgangsfeuchte u_0 zu bestimmen. Danach wurde die Probe an dieser Oberfläche getrocknet. Nach Beendigung der Trocknung wurde ein einzelner Span abgenommen, um die Endfeuchte u_t zu bestimmen. Der Span wurde sofort gewogen, um das Ausgangsgewicht mit einer Genauigkeit von 0,001 g unverzüglich zu bestimmen.

Temperatur	Messpunkte			
80 °C	10 min	18 min	26 min	34 min
100 °C	6 min	10 min	16 min	22 min

Tabelle 1: Temperatur und dazugehörige Messpunkte

Die Ausgangsfeuchte u_0 und Endfeuchte u_t wurden mit der Darmmethode nach EN 13183-1 bestimmt. Die Holzgleichsfeuchte u , als Prozentsatz angegeben, wird laut Norm mit Hilfe des Masseverlusts des Holzkörpers nach der Trocknung bestimmt. Der Masseverlust errechnet sich aus der Masse des Holzkörpers vor

und nach der Trocknung. Die Trocknung gilt als beendet, wenn sich Massekonstanz einstellt. Eine Massekonstanz ist erreicht, wenn zwischen zwei Wägungen im Abstand von sechs Stunden der Masseverlust gleich oder weniger als 0,5 % beträgt. Die Trocknung findet in einem Darrschrank bei 103 ± 2 °C statt. Für die Bestimmung sollen Prismen mit quadratischem Querschnitt mit einer Seitenlänge von 20 mm und 25 ± 5 mm Länge verwendet werden. Die Probengeometrie entspricht jedoch nicht der Norm, da es sich um Späne mit einer Zieldicke von 150 µm handelt. Ferner wurde die Massekonstanz nach zwei Wägungen im Abstand von 30 Minuten bestimmt. Die Holzfeuchte wird laut Norm anhand folgender Gleichung berechnet:

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} * 100\%$$

u ... Holzfeuchte

m_u ... Masse des feuchten Holzes

m_0 ... Masse des darrtrockenen Holzes

Trotz möglichst rascher Arbeit ist bei der relativ großen Oberfläche des Spanes mit einem gewissen Fehler zu rechnen (rasches Abtrocknen des Spans bei der Manipulation vor dem Verwägen, bzw. Einfluss von Reibwärme beim Hobelschnitt und damit verbundenes Abtrocknen). Diese Einflüsse wurden in einer früheren Arbeit von Teischinger & Vanek (1987) erfasst. Sie sind jedoch im Rahmen der vorliegenden Untersuchung vernachlässigbar und wurden daher in der Folge auch nicht weiter beachtet bzw. als systematischer Fehler betrachtet.

3.2.4. statistische Auswertung

Die statistische und graphische Auswertung in Form der Plots wurden mit R Statistics von Cran realisiert. Die Trocknungsrate oberhalb von 30 % Holzfeuchte wurde anhand der Ausgangsfeuchte mit Hilfe einer linearen Regression modelliert. Die Trocknungsrate wurde anhand folgender Gleichung berechnet:

$$TR = \frac{\Delta u}{t}$$

wobei:

$$\Delta u = u_0 - u_t$$

TR ... Trocknungsrate [%/min] t ... Zeit [min]

Δu ... Trocknungsdifferenz [%] u_0 ... Ausgangsfeuchte [%]

u_t ... Endfeuchte [%]

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Trocknungsversuche bei 80 °C und 100 °C sind in Abbildung 23 dargestellt.

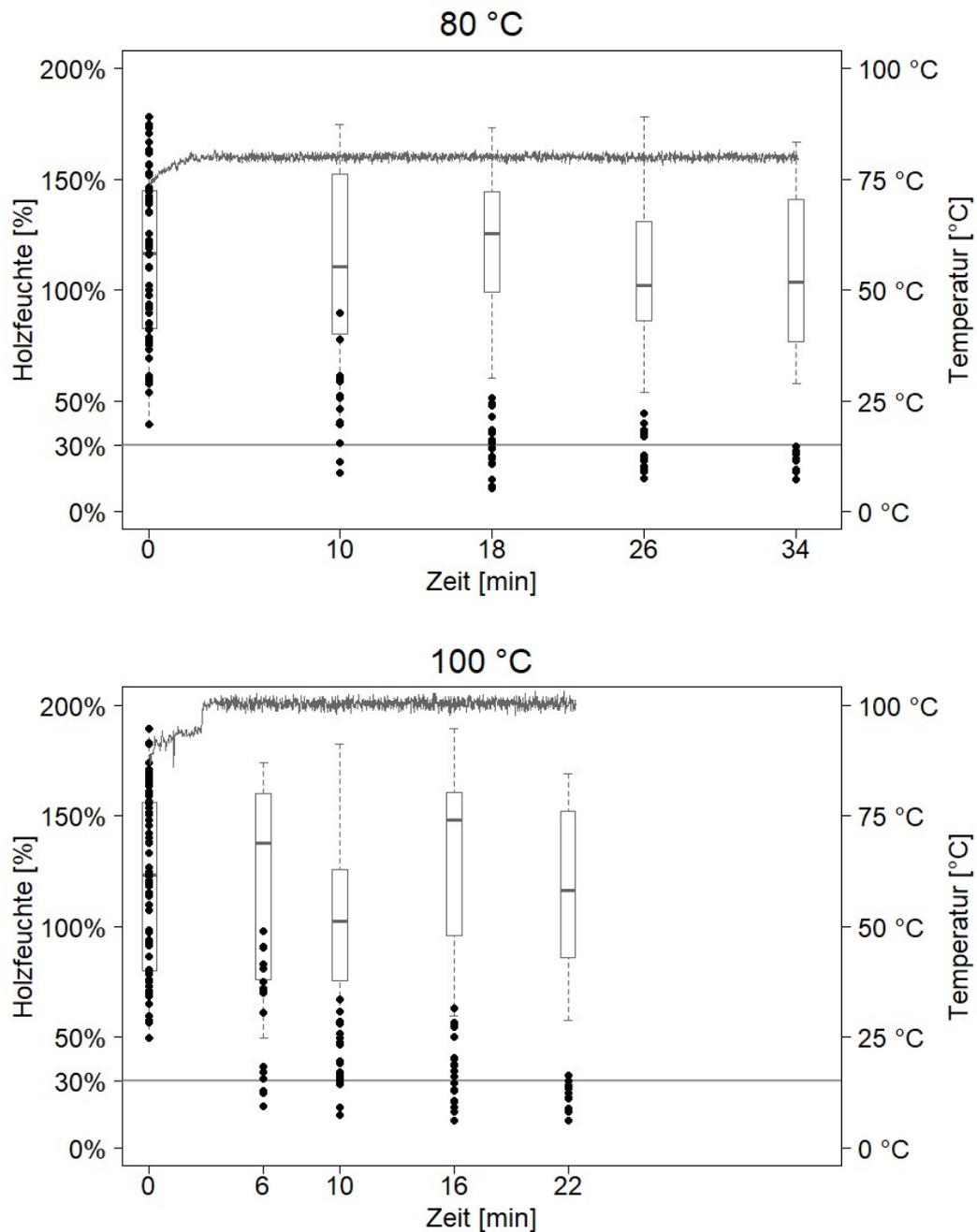


Abbildung 23: Ergebnisse der Trocknung bei 80 °C (oben) und 100 °C (unten). Die Boxplots stellen die Ausgangsfeuchte der Proben zum jeweiligen Zeitpunkt dar. Die Punkte zeigen die Endfeuchte dieser Proben nach der Trocknung. Die Linie bildet den Temperaturverlauf an der Oberfläche ab.

Die Punkte und der dahinterliegende Boxplot am Start der Trocknung (zum Zeitpunkt 0) zeigen die Ausgangsfeuchten u_0 des gesamten Probenmaterials ($n=63$ bei 80 °C und $n=72$ bei 100 °C). Die Boxplots zu den anderen Zeitpunkten zeigen die Ausgangsfeuchte u_0 jener Proben, die zur Messung zu diesem Zeitpunkt herangezogen wurde. Die Punkte zeigen die Endfeuchte u_t dieser Proben. Die Linie zeigt den Temperaturverlauf an der Oberfläche der Holzprobe.

Es zeigt sich das sowohl bei 80 °C als auch bei 100 °C Proben mit geringer Ausgangsfeuchte u_0 von circa 50% in wenigen Minuten unter den Fasersättigungsbereich getrocknet werden. Nach 34 Minuten bei 80 °C und 22 Minuten bei 100 °C sind auch Proben mit einer hohen Ausgangsfeuchte u_0 von circa 170% unter 30% getrocknet. Proben mit geringer Ausgangsfeuchte (50%) sind auch nach dieser langen Trocknungsdauer nicht weit unter den Fasersättigungsbereich abgetrocknet. Die Endfeuchte u_t stellt sich knapp unterhalb von 30% ein. Die Trocknungsgeschwindigkeit senkt sich ab 30% deutlich ab. Dadurch sinkt auch die Streuung der Endfeuchte u_t mit Fortschreiten der Trocknung.

Abbildung 24 zeigt die Trocknungsrate [%/min] abhängig von der Ausgangsfeuchte u_0 [%] bei 80 °C und 100 °C . Die Geraden zeigen die linearen Regressionsmodelle (Tabelle 2). Bei einer Holzfeuchte unterhalb von 30% ist die Trocknungsrate nicht mehr konstant und die Kurve würde vom linearen Bereich abweichen. Die Regressionsgeraden sind deshalb unter 30% nicht dargestellt. In Abbildung 25 sind die Regressionsgeraden beider Temperaturniveaus dargestellt.

Temperatur	Regressionskoeffizienten			Kennzahlen		
	α	β	ε	R^2	$R^2_{\text{adj.}}$	p-Wert
80 °C	-0,884	0,046	1,622	0,5328	0,5251	0,00002
100 °C	0,32	0,054	2,361	0,4522	0,4444	0,00016

Tabelle 2: Zusammenfassung der Regressionsmodelle

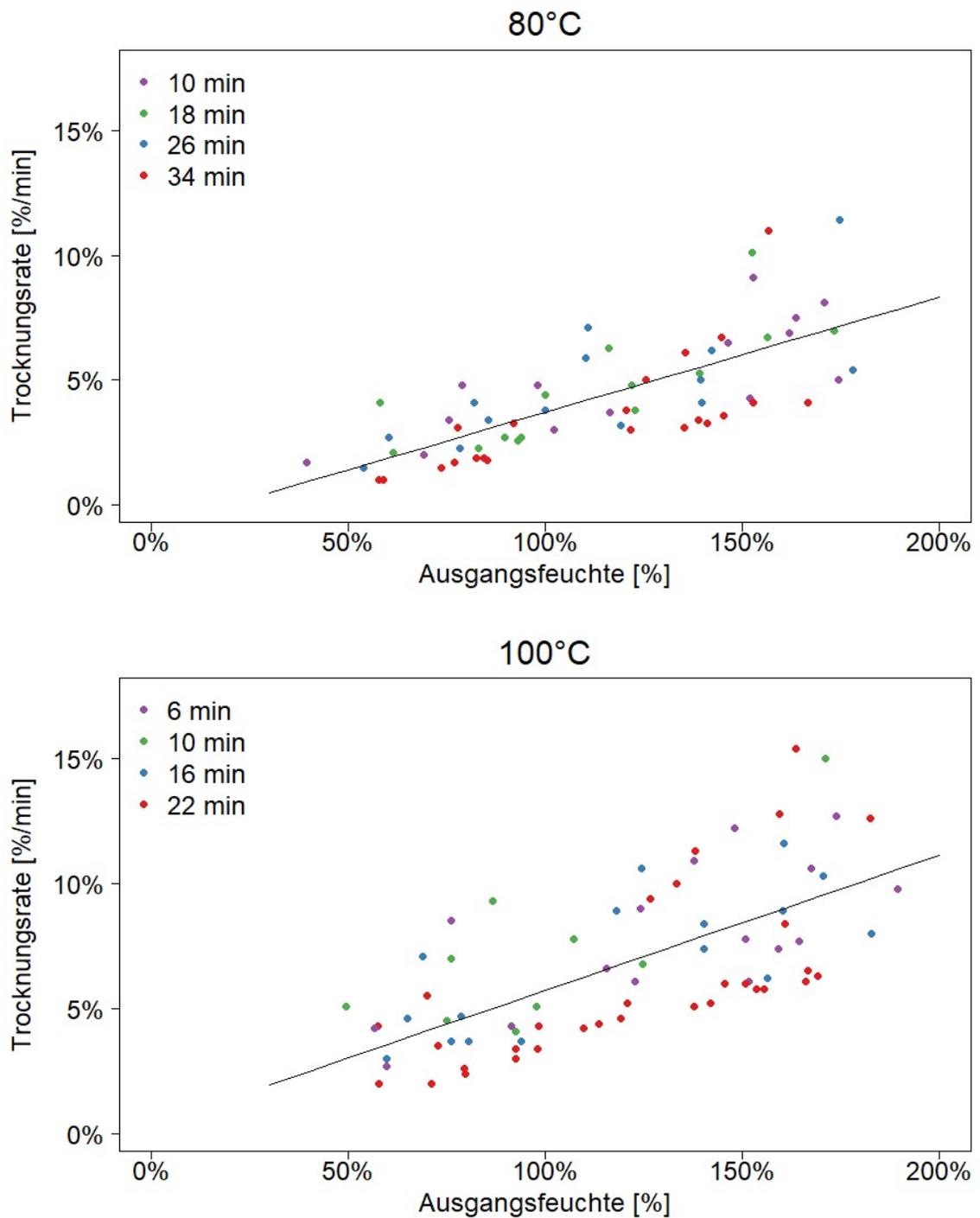


Abbildung 24: Trocknungsrate [%/min] in Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte [%] bei 80 °C (oben) und 100 °C (unten). Die Gerade stellt die Regressionsgleichung der Trocknungsrate dar.

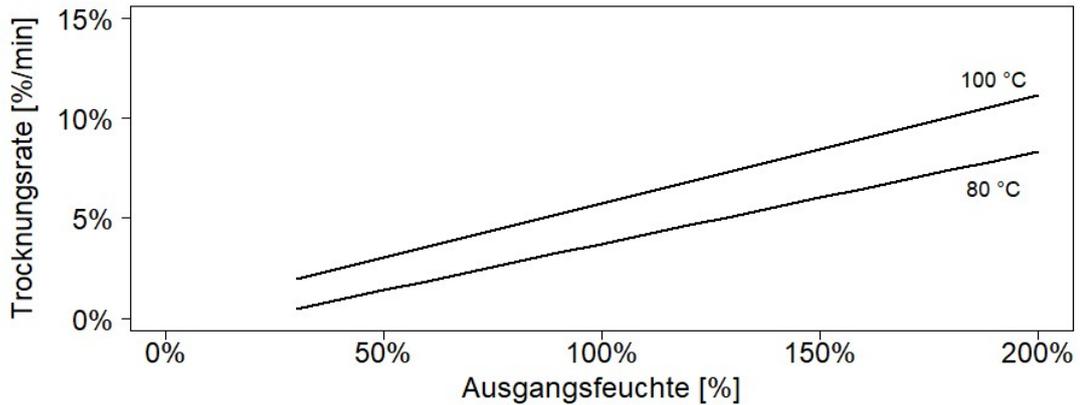


Abbildung 25: Regressionsmodelle der Trocknungsraten [%/min] in Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte [%] bei 80 °C und 100 °C. Die beiden Geraden stellen die jeweilige Regressionsgleichung für die Trocknungsrate dar.

Der Einfluss der Ausgangsfeuchte u_0 auf die Trocknungsrate ist klar erkennbar. Je höher die Ausgangsfeuchte, desto höher die Trocknungsrate, unabhängig bei welcher Temperatur getrocknet wird. Bei höherer Temperatur läuft die Trocknung schneller ab. Der Regressionskoeffizient β ist bei 100 °C um circa 20 % höher als bei 80 °C (Tabelle 2). Die Varianz der Trocknungsrate steigt ebenfalls mit der Holzfeuchte (Abbildung 26). Außerdem wurde bei 100 °C im Allgemeinen eine höhere Varianz als bei 80 °C festgestellt.

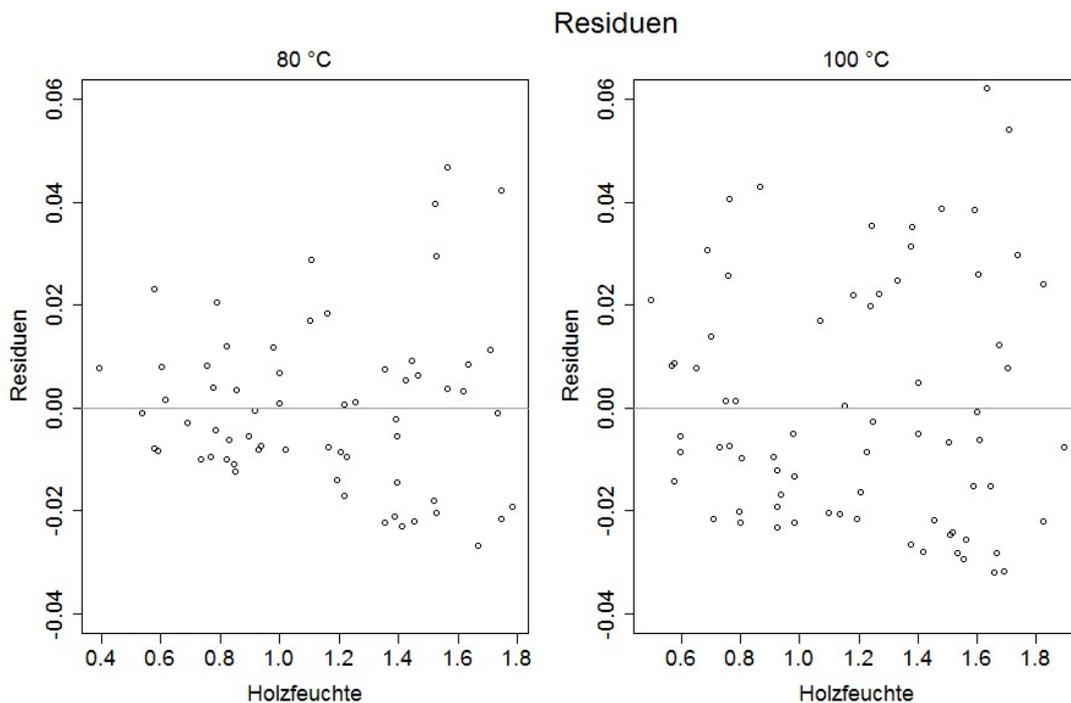


Abbildung 26: Residuen der linearen Regression bei 80 °C und 100 °C

5. Zusammenfassung

Eine Trocknung der ersten fünf Zellreihen unter den Fasersättigungsbereich ist in kurzer Zeit mit geringerer Schwankung im Vergleich zur Ausgangsfeuchte möglich. Die Trocknung ist sowohl bei 100 °C und 80 C zu bewerkstelligen. Die Trocknungsrate ist bei 100 °C zwar höher, jedoch sinkt die Streuung der Endfeuchte nicht. Das ist ein Anzeichen dafür, dass Temperatur keinen großen Einfluss auf die Trocknung des freien Wassers hat. Steiner (2008) und Simpson (1997) zeigen, dass insbesondere die Luftgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Trocknungsrate oberhalb der Fasersättigung hat.

Eine Gefahr des Übertrocknens ist nicht gegeben. Die Trocknungsgeschwindigkeit sinkt ab dem Fasersättigungsbereich zu stark ab. Die Trocknung des gebundenen Wassers schreitet im Vergleich zum freiem Wasser so langsam voran, dass sich eine Holzfeuchte knapp unterhalb der Fasersättigung einstellt.

Die Spandicke hat keinen signifikanten Einfluss auf die Trocknungsrate. Das lässt vermuten, dass die Trocknung tiefer als die angestrebten 150 µm geht. Daneben kommt es unterhalb der Fasersättigung zum Tüpfelverschluss. Diese beiden Faktoren wirken dem Nachfließen des Wassers in tangentialer Richtung entgegen.

Die Vortrocknung stellt eine geeignete Methode für die Verklebung im feuchten Zustand dar. Die Vortrocknung bis zur Fasersättigung minimiert das Risiko einer verhungerten Leimfuge. Die Trocknung lässt sich ohne hohe Temperatur und Luftgeschwindigkeit durchführen. Die gewählten Trocknungsparameter können innerhalb der Industrie ohne größeren Aufwand bereitgestellt werden und die Vortrocknung dadurch implementiert werden. In der Furnierindustrie ist ein schnelles Trocknen von kleinen Querschnitten bereits Teil der Prozesskette. 1,6 mm dicke Furniere aus Birkenholz können in wenigen Minuten bei hoher Temperatur und Luftgeschwindigkeit unter Fasersättigungsbereich und weiter getrocknet werden (Hukka & Oksanen 1999).

Aufgrund der kleinen Dimension der zu trocknenden Schicht kann es zu großen Dichteunterschieden kommen. Je nachdem ob Früh- oder Spätholz dominiert, variiert die Dichte sehr stark. So kann die Spätholzdichte von Fichte das 5,5-fache höher sein als die Frühholzdichte. Mit steigender Dichte sinkt die Trocknungsrate. Daher sind lokale Schwankungen der Holzfeuchte innerhalb der zu trocknenden Schicht zu erwarten. (Wagenführ 2007; Steiner 2008).

Daneben besteht die Gefahr eines Zellkollapses während der Trocknung (siehe Kap. 2.2 Holz Trocknung) und Trocknungsfehler aufgrund der Schwindung. Beide

Faktoren können sogenannte Weak Mechanical Boundary Layers entstehen lassen, die einer zuverlässigen Verklebung entgegenwirken.

Das von den Normen für die Verklebung vorgegebene Feuchtefenster von 6 % bis 15 % ist jedoch zu klein, um es mit dieser Form der Trocknung zu erreichen. Unter der Fasersättigung spielt die Luftgeschwindigkeit nur noch eine untergeordnete Rolle, das macht eine zielgenaue Trocknung mittels Konvektion innerhalb kurzer Zeit unerreichbar. Solange restriktive Vorgaben betreffend der Holzfeuchte in den Normen enthalten sind, bleibt als Alternative eine technische Zulassung des Produkts auf nationaler oder europäischer Ebene. Dafür müssen jedoch die Festigkeitseigenschaften und die Produktion genau dokumentiert und ein System für die Qualitätskontrolle entwickelt werden.

6. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperatur und dazugehörige Messpunkte	26
Tabelle 2: Zusammenfassung der Regressionsmodelle	29

7. Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der miteinander verbundenen Prozessketten für den Rohstoff Holz inklusive von Materialrückführungen im Zuge von Recycling (Teischinger 2014).....	1
Abbildung 2: Vereinfachte und schematische Darstellung von zwei ausgewählten Produkten mit Hinblick auf die „Ausbeute“ vom Rohstoff zum Endprodukt (Teischinger 2014).....	2
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Stammes: KHO – Kernholz, SpHO – Splintholz, KA – Kambium, BA – Bast, BO – Borke (Braun 1998) .	4
Abbildung 4: Schematische Darstellung der hierarchischen Struktur und Zusammensetzung von Holz: (a) elektronenmikroskopisches Bild eines Nadelholzblocks mit Frühholz (EW) und Spätholz (LW); (b) genauere Betrachtung der einzelnen Zellwandschichten (P: Primär, S1-, S2-, S3-Schicht); (c) Atomkraftmikroskop (AFM) Bild einer sekundären Zellwand mit dem Cellulose-Mikrofibrillenwinkel (MFA). (d) Tüpfel, die den Wasserfluss zwischen verbundenen Tracheiden ermöglichen; (e) zeigt eine einzelne Makrofibrille mit ihrer Zusammensetzung (Legende) (Felhofer 2016)	4
Abbildung 5: schematische Darstellung eines Hoftüpfels zwischen zwei Tracheiden (Rosenthal et al. 2010).....	5
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bindungsformen von Wasser und Holz (Niemz 1993)	7
Abbildung 7: Laminare und turbulente Strömung über einer ebenen Fläche. Die gestrichelte Linie stellt die Grenzschicht dar (Mandavi 2006).....	9
Abbildung 8: Erste Trocknungsphase: Das Wasser wandert im Medium durch Kapillarkräfte an die Oberfläche. Dort verdunstet das Wasser und wird als Dampf vom Dampf-Luft-Strom abgeführt (Perré 1999).....	10
Abbildung 9: Darstellung der Verdunstung von Wasser aus einer Kapillare (a bis d) und der Verdunstung von freiem Wasser aus dem Holzkörper (e bis n) (Siau 1984).....	12
Abbildung 10: Zweite Trocknungsphase: Aus der Grenzfläche entsteht ein Bereich im hygrokopischen Bereich. In diesem Bereich wirken sowohl	

Dampfdiffusion als auch gebundene Wasserdiffusion. Die Verdunstung findet teilweise im Medium statt. Infolgedessen muss ein Wärmefluss zu dem inneren Teil des Körpers durch Leitung gewährleistet sein (Perré 1999). . 13

Abbildung 11: Arten der Wasserdampfdiffusion durch eine Zelle (Kang et al. 2008)	14
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Tüpfelverschlusses. a) Meniskus im Tüpfel; b) ringförmiger Meniskus zwischen Zellwand und Torus; c) Menisken zwischen Öffnungen des Margo; d) verschlossener Tüpfel; e) Torus legt sich aufgrund der entstehenden Kapillarkraft ganz an Zellwand an; f) komplett geschlossener Tüpfel (Siau 1984).....	15
Abbildung 13: Marras Modell schematisch (links) (Marra 1992) und in einer fluoreszenzmikroskopischen Darstellung einer Verklebung mit einem Epoxyharz (Frihart 2005)	17
Abbildung 14: Mikrostruktur eines Holzquerschnittes mit Darstellung völliger Feuchtesättigung (links) und Abtrocknung einer kleinen Randschichte von etwa zwei bis drei Zellreihen (rechts). Fh – Frühholztracheiden, Sh – Spätholztracheiden, Jg – Jahrringgrenze, HS – Holzstrahl, H – Harzkanal, HS(H) – harzgangführender Holzstrahl, Q – Querschnitt, T – Tangentialschnitt, R – Radialschnitt (Wagenführ 1999).....	18
Abbildung 15: Vereinfachtes Flussdiagramm des Nassverklebungsprozesses (oben) und des konventionellen Verklebungsprozesses (unten)	19
Abbildung 16: Typisches Profil einer Keilzinkenverbindung; lj – Zinkenlänge, p – Zinkenteilung, α – Flankenneigung, lt – Zinkenspiel, bt – Breite der Zinkenspitze (EN 14080)	21
Abbildung 17: Schnittbild des Rundholzes, das für den Versuch verwendet wurde Die Proben wurden aus der grau markierten Seitenware hergestellt.....	23
Abbildung 18: Vereinfachte Darstellung des Auftrennens der Bretter (links) in die endgültige Probengeometrie (rechts). Die roten Linien zeigen die Schnittfugen. Sofort nach dem Auftrennen wurden die Proben auf der Radialseite gehobelt.	23
Abbildung 19: Ausgangsfeuchte dargestellt als Boxplot, $n = 135$	24
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Trocknung bzw. Belüftung über eine Heißluftpistole	25
Abbildung 21: Für die Spanabnahme modifizierte Raubank	25

Abbildung 22: Boxplot für die Spandicke. Die graue Linie stellt die Zieldicke dar.	26
Abbildung 23: Ergebnisse der Trocknung bei 80 °C (oben) und 100 °C (unten). Die Boxplots stellen die Ausgangsfeuchte der Proben zum jeweiligen Zeitpunkt dar. Die Punkte zeigen die Endfeuchte dieser Proben nach der Trocknung. Die Linie bildet den Temperaturverlauf an der Oberfläche ab.	28
Abbildung 24: Trocknungsrate [%/min] in Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte [%] bei 80 °C (oben) und 100 °C (unten). Die Gerade stellt die Regressionsgleichung der Trocknungsrate dar.	30
Abbildung 25: Regressionsmodelle der Trocknungsraten [%/min] in Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte [%] bei 80 °C und 100 °C. Die beiden Geraden stellen die jeweilige Regressionsgleichung für die Trocknungsrate dar.	31
Abbildung 26: Residuen der linearen Regression bei 80 °C und 100 °C.	31

8. Literaturverzeichnis

- Arnold, K. et al., 2009. Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen: ein Konzept zur Verbesserung der Rohstoffeffizienz und Optimierung der Landnutzung.
- Böhner, G., Wagner, L. & Säcker, M., 1993. Elektrische Messung hoher Holzfeuchten bei Fichte. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 51(3), pp.163–166. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF02628273>.
- Braun, H.J., 1998. *Bau und Lebend der Bäume* 4th ed., Freiburg: Rombach GmbH.
- Currier, R., 1960. Fingerjointing at high moisture content. *Forest Products Journal*, 10(6), pp.287–293.
- Dunky, M. & Niemz, P., 2002. *Holzwerkstoffe und Leime* 1st ed., Berlin Heidelberg: Springer.
- EN 13183-1, 2002. *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*, Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 13307-1, 2007. *Holzkanteln und Halbfertigprofile für nicht tragende Anwendungen - Teil 1: Anforderungen*, Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 14080, 2013. *Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen*, Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1995-1-1, 2010. *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Holzbau*, Brussels: European Committee for Standardization.

- FAO, 2009. Global Demand for Wood Products. *State Of The Worlds Forests*, p.96.
- Felhofer, M., 2016. *RAMAN imaging to reveal in-situ molecular changes of wood during heartwood formation and drying*. Universität für Bodenkultur Wien.
- Fengel, D. & Wegener, G., 1984. *Wood - chemistry, ultrastructure, reactions*, Berlin: W. de Gruyter.
- Fotsing, J.A.M. & Tchangang, C.W., 2005. Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions. *Heat and Mass Transfer*, 41(11), pp.977–980.
- Frihart, C.R., 2005. Utility of Horioka's and Marra's models for adhesive failure. *Wood adhesives 2005*, pp.233–238.
- Hansmann, C., 2007. Starke Streuung der Holzfeuchte. *Holz-Zentralblatt*, 133(43), pp.1206–1207.
- Haß, P., 2012. *Penetration behavior of adhesives into solid wood and micromechanics of the bondline*. ETH Zürich.
- Hirmke, M., 1999. *Einfluß des Schlägerungszeitpunktes auf die natürliche Dauerhaftigkeit von Fichte (Picea abies [L.] Karst.)*. Universität für Bodenkultur Wien.
- Horioka, K., 1968. Review of adhesion durability. *Journal of Adhesion Society of Japan*, 4, pp.375–400.
- Hukka, A. & Oksanen, O., 1999. Convective Mass Transfer Coefficient at Wooden Surface in Jet Drying of Veneer. *Holzforschung*, 53(2), pp.204–208.
- Källander, B. & Leogrand, G., 2008. European Standards Influencing Green Glued Products. In B. Källander, ed. *COST Action E34 - Bonding Of Timber - Working Group 2: Green Glueing*. pp. 150–155.
- Kamke, F.A. & Lee, J.N., 2007. Adhesive penetration in wood: a review. *Wood and Fiber Science*, 39(2), pp.205–220.
- Kang, W. et al., 2008. The effect of openings on combined bound water and water vapor diffusion in wood. *Journal of Wood Science*, 54(5), pp.343–348.
- Knigge, W. & Schulz, H., 1966. *Grundriss der Forstbenutzung: Entstehung, Eigenschaften, Verwertung und Verwendung des Holzes und anderer Forstprodukte*, Parey. Available at: <https://books.google.at/books?id=dQNGAAAAMAAJ>.
- Kreibich, R.E., 1974. High speed adhesives for the wood gluing industry. *Adhesive Age Journal*, 17, pp.26–33.
- Kreibich, R.E., Steynberg, P.J. & Hemingway, R.W., 1998. End jointing Green Lumber with SoyBond. In *Wood Residues into Revenue: Residual Wood Conference Proceedings*. Richmond, British Columbia: MCTI Communications Inc., pp. 28–36.
- Krischer, O., 1978. *Trocknungstechnik* 3rd ed. W. Kast, ed., Berlin Heidelberg: Springer.
- Lange, D.A., Fields, J.T. & Stirn, S.A., 2000. *Fingerjoint application potentials for one-part polyurethanes*, Madison: Forest Products Society.

- Lipke, M., 2005. Green glued fingerjoint wall studs: industrial experience of Hampton Lumber Mills. In Källander, ed. *COST Action E34 - Green Gluing of Wood - Process - Products - Market*. Böras, Schweden: Kal, pp. 91–98.
- Mandavi, 2006. Turbulente Strömung. *Wikipedia*. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turbulente_Stroemung.png.
- Mantanis, G.I., Karastergiou, S. & Barboutis, I., 2011. Finger jointing of green Black pine wood (*Pinus nigra* L.). *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(1), pp.155–157.
- Marra, A.A., 1992. *Technology of Wood Bonding: Principles in Practice*, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Maun, K., 2008. Introduction to Green Glueing. In B. Källander, ed. *COST Action E34 - Bonding Of Timber - Working Group 2: Green Glueing*. pp. 105–106.
- Maun, K. & Cooper, G., 1999. Re-engineering softwood for constructional use by wet (green) gluing. In S. Berti et al., eds. *Industrial end-uses of fast-grown species*. Florence, Italy, pp. 47–59.
- Müller, U. et al., 2015. Innovative mechanische Trenntechnologien von Holz. *Holztechnologie*, 1, pp.29–34.
- Niemz, P., 1993. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag.
- Perré, P., 1999. How to Get a Relevant Material Model for Wood Drying Simulation ? *COST Action E 15 - Advances in drying of wood (1999-2003)*, (January), pp.1–34.
- Pizzi, A. & Cameron, F., 1984. Fast-set adhesives for glulam. *Forest Products Journal*, 34(9), pp.61–68.
- Pizzi, A. & Roux, D., 1978. The chemistry and development of tannin-based weather- and boil-proof cold setting and fast-setting adhesives for wood. *Journal of Applied Polymer Science*, 22, pp.1945–1954.
- Pommier, R. & Elbez, G., 2006. Finger-jointing green softwood: Evaluation of the interaction between polyurethane adhesive and wood. *Wood Material Science and Engineering*, 1(3–4), pp.127–137.
- Rosenthal, M., Bäucker, E. & Bues, C.-T., 2010. Zum Einfluss der Mikrostruktur des Holzes auf das Eindringverhalten von Flüssigkeiten. *Holz-Zentralblatt*, (34), pp.852–854.
- Sathre, R. & Gustavsson, L., 2009. Process-based analysis of added value in forest product industries. *Forest Policy and Economics*, 11(1), pp.65–75. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934108000816>.
- Sell, J., Schnell, G.R. & Arnold, M., 1987. Anteil und Wassergehalt des Splints von schweizerischen Fichten und Tannen unterschiedlicher Vitalität. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 45(8), pp.329–334. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF02605844>.
- Serrano, E. et al., 2010. Green-glued laminated beams : High performance and added value. In *World Conference on Timber Engineering*.

- Siau, J.F., 1984. *Transport Processes in Wood* 1st ed., Berlin Heidelberg: Springer.
- Simpson, W.T., 1997. Effect of air velocity on the drying rate of single eastern white pine boards. *Research note FPL ; RN-0266*, pp.1–5.
- Skaar, C., 1988. *Wood-Water Relations*, Berlin Heidelberg: Springer.
- Steiner, Y., 2008. *Optimizing the Air Velocity in an Industrial Wood Drying Process*. Norwegian University of Life Sciences (UMB).
- Sterley, M., 2012. *Characterisation of green-glued wood adhesive bonds*. Linnaeus University.
- Sterley, M., Blümer, H. & Wälinder, M.E.P., 2004. Edge and face gluing of green timber using a one-component polyurethane adhesive. *Holz als Roh - und Werkstoff*, 62(6), pp.479–482.
- Strickler, M., 1970. End gluing of green lumber. *Forest Products Journal* 1, 20(9), pp.47–51.
- Teischinger, A., 2016. Bioökonomie in Österreich. In *Tagungsband des 17. Holztechnologischen Kolloquiums Dresden*. Dresden: Institut für Holz- und Papiertechnik der TU Dresden, pp. 11–17.
- Teischinger, A., 2012. Holzvergütung. In F. Scholz & A. Wagenführ, eds. *Taschenbuch der Holztechnik*. Leipzig: Carl Hanser Verlag, pp. 433–456.
- Teischinger, A., 2014. Ressourceneffiziente Holznutzung? Technologische Einsparungspotenziale im Spannungsfeld von Material - und Ressourceneffizienz und der kaskadischen Nutzung von Holz.
- Teischinger, A. & Vanek, M., 1987. Eignung verschiedener Auftrennmethode zur Bestimmung eines Feuchtegradienten im Holz nach der Darmmethode. *Holzforschung und Holzverwertung*, 39, pp.5–8.
- Tiedemann, G., Sanclemente, M. & Smith, H., 1973. The chemistry of fast-curing phenolic adhesives: part II. *Journal of Applied Polymer Science*, 17, pp.1813–1818.
- Trendelenburg, R. & Mayer-Wegelin, H., 1955. *Das Holz als Rohstoff*, C. Hanser. Available at: <https://books.google.at/books?id=Ov8zAQAAIAAJ>.
- Troughton, G. & Chow, S., 1980. Fingerjointing kiln dried and unseasoned white spruce lumber using WFPL method. *Forest Products Journal*, 30(12), pp.48–49.
- Trübswetter, T., 2009. *Holztrocknung* 2nd ed., München: Carl Hanser Verlag.
- Wagenführ, R., 1999. *Anatomie des Holzes* 5th ed., Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag.
- Wagenführ, R., 2007. *Holzatlas* 6th ed., Leipzig: Carl Hanser Verlag.