

Feuchteverformung des wärmebehandelten Holzes entlang der Sorptionsisotherme

Report**Author(s):**

Popper, Rudolf; Niemz, Peter; Eberle, G.

Publication date:

2004

Permanent link:

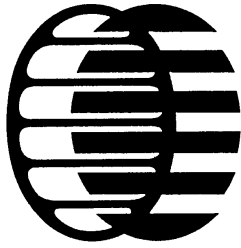
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004894915>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Int. Bericht ETHZ/IBWK-HP 6



Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion
Gruppe Holzphysik
ETH Zentrum
CH-8092 Zürich

Int. Bericht ETHZ/IBWK-HP Nr. 6

**Feuchteverformung des wärmebehandelten Holzes entlang
der Sorptionsisotherme**

R. POPPER, P. NIEMZ, G. EBERLE

Zürich, 28. Januar 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Material, Methoden und Begriffe	4
2.1	Holz- und Behandlungsarten	4
2.2	Konditionierungsarten	4
2.3	Relative Luftfeuchtigkeit.....	5
2.4	Rohdichte	6
2.5	Feuchtigkeitsgehalt.....	6
2.6	Feuchteverformung	7
2.6.1	Lineares Quellmass.....	7
2.6.2	Differentielle Quellung.....	7
2.7	Anisotropiekoeffizient.....	8
2.8	Dimensionsstabilität	8
2.9	Wasserdampfsorption.....	9
3	Resultate und Diskussion	10
3.1	Sorptionseigenschaften.....	10
3.1.1	<i>Pinus radiata</i>	10
3.1.2	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	12
3.1.3	<i>Laurelia sempervirens</i>	15
3.1.4	<i>Castanea sativa</i>	17
3.1.5	<i>Quercus robur</i>	19
3.2	Transversale lineare Quellung entlang der Sorptionsisotherme	21
3.2.1	<i>Pinus radiata</i>	21
3.2.2	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	22
3.2.3	<i>Laurelia sempervirens</i>	22
3.2.4	<i>Castanea sativa</i>	23
3.2.5	<i>Quercus robur</i>	24
3.3	Differentielle Quellung.....	24
3.4	Anisotropiekoeffizient.....	28
3.5	Dimensionsstabilität (ASE).....	28
3.6	Normal-Rohdichte	30
4	Schlussfolgerungen	31
5	Literatur	35

1 Einleitung

Der Einfluss von Wärme auf das Holz ist je nach Höhe der Temperatur, der Einwirkungsdauer, der Heizrate und der Anfangsfeuchtigkeit des Holzes vielfältig.

Den Einfluss des Trocknens von Holz auf seine hygroskopischen Eigenschaften haben mehrere Wissenschaftler untersucht und dabei festgestellt, dass bei Temperaturen über 70°C getrocknetes Holz eine geringere **Gleichgewichtsfeuchtigkeit** aufweist als unter natürlichen Bedingungen (Freilufttrocknung) getrocknetes Holz (NAGRODSSKI in ENGER 1937; WISE und JAHN 1952; ORMAN 1955; SCHNEIDER 1973, KININ-MONTH 1976; SUEMATSU ET AL. 1980; POPPER 1991).

Den Einfluss von Wärme auf die **Steifigkeit** und **Formstabilität** haben HILLIS und ROZSA (1985b) an *Pinus radiata* mit der Torsionsmethode untersucht. Der Drehwinkel wurde dabei als ein Maß für die Stabilität des Holzes angenommen. POPPER UND EBERLE (1993) haben bei einer schnellen, linear ansteigenden Erwärmung des trockenen Holzes (*Pinus radiata*) zwischen 120°C und 170°C auf der thermomechanischen Kurve eine irreversible **Umwandlungstemperatur** von 154°C festgestellt. Der Verlauf der thermomechanischen Kurve deutete auf eine Erhöhung der Strukturordnung des Materials hin, was einer Vergütung des Holzes gleich kommt.

Im Temperaturbereich von 20°C bis 120°C haben HILLIS und ROZSA (1985a) mit der Torsionsmethode an *Pinus radiata* zwei **Erweichungspunkte** bei ca. 80°C und ca. 100°C gefunden. Temperatureinwirkung bei hoher Materialfeuchte führt zur **Plastifizierung** des Holzes (SCHUERCH 1964; BARISKA ET AL. 1969).

Die **Wärmeausdehnung** des trockenen Holzes ist von der Heizrate abhängig (POPPER UND EBERLE 1992).

Die Wärmebehandlung von Holz wird je nach Behandlungstemperatur mehr oder weniger durch **Massenverlust** begleitet. Eine Übersicht über Untersuchungen des Massenverlustes von Nadelholz im Temperaturbereich zwischen 90°C und 300°C findet man bei STAMM (1956) und bis 180°C bei TOPF (1971A, 1971B).

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der thermischen Vergütung des Holzes im Temperaturbereich zwischen 100°C und 200°C, wobei durch die Sorptionsanalyse versucht wurde, den Vergütungsmechanismus zu erklären.

2 Material, Methoden und Begriffe

2.1 Holz- und Behandlungsarten

Die Feuchteverformungsversuche wurden an fünf Holzarten

- Radiata pine (*Pinus radiata* D. Don),
- Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco),
- Laurel (*Laurelia sempervirens* (R. et Pav.) Tul.),
- Edelkastanie (*Castanea sativa* Mill.),
- Eiche (*Quercus robur* L.)

durchgeführt.

Die Probenausmasse aller Proben betragen: tangential x radial x axial = 40 x 40 x 5 mm. Die Proben wurden je drei Wärmebehandlungen (100°C, 150°C und 200°C) während 24 Stunden unterworfen und als Bezugsprobe jeweils unbehandelt belassen. Der Probenzuschnitt sowie die Wärmebehandlungen wurden an der Universidad Austral de Chile in Valdivia/Chile durch ihre Mitarbeiter durchgeführt. Alle Proben wurden nacheinander sieben verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten (siehe Tabelle 3-1) ausgesetzt (Darrzustand als Bezugsgrösse). Die Feuchteverformungsmessungen in den zwei anatomischen Hauptrichtungen (Tangential- und Radialrichtung) wurden an je 10 Proben pro Hauptrichtung und Holzart gemessen. Parallel dazu wurden an allen Proben Wasserdampf-Sorptionsmessungen durchgeführt.

2.2 Konditionierungsarten

Die Proben wurden bei einer definierten Temperatur verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten solange ausgesetzt, bis das Gleichgewicht erreicht wurde, anschliessend wurde der jeweilige Feuchtegehalt der Proben bestimmt. Tabelle 2-1 zeigt die ausgewählten Klimate für die Feuchteverformungs- sowie für die Sorptionsmessungen und ihre Erzeugung. Für das Normalklima nach DIN 50 014 (1985) diente der Klimaraum, die anderen Klimate wurden in speziellen Behältern durch gesättigte wässrige Salzlösungen hergestellt, wobei hier der Klimaraum lediglich für die Temperaturkonstanz sorgte. Die Luftzirkulation in den Behältern wurde mit einem Ventilator bewerkstelligt. Damit er nicht unnötig Wärme an den Behälter abgab, wurde er mit Hilfe eines Zeitschal-

ters im Intervall von 15 Minuten ein- und ausgeschaltet. Für die Ermittlung des Versuchsklimas sorgte ein Klimasensor, bei dem die rel. Luftfeuchtigkeit mittels eines elektrolytischen Widerstandselements und die Temperatur mittels eines NTC-Widerstands gemessen wurden. Das hygrometrische Messelement ermöglichte eine relative Feuchtigkeitsmessung im Bereich zwischen 5% und 95%. Für den Messwert bei der rel. Luftfeuchtigkeit von 0% wurde der Darrzustand verwendet. Die Prüfkörper wurden bei den jeweiligen Klimabedingungen solange klimatisiert, bis die Massekonstanz erreicht wurde. Die Massekonstanz galt als erreicht, wenn die Ergebnisse zweier im Abstand von 24 Stunden aufeinander folgender Messungen um nicht mehr als 0.1% der Prüfkörpermasse voneinander abwichen.

Als Bezugsmasse für die Bestimmung der Materialfeuchte wurde die Darrmasse benutzt.

Tabelle 2-1: Die verwendeten Klimate und ihre Erzeugung

Klimaerzeugung	rel. Luftfeuchtigkeit (%)	Temperatur (°C)
Darrtrocknung	0	105
LiCl	11±1	22±1
Klimakammer	20±1	22±1
Klimakammer	30±1	22±1
K ₂ CO ₃	44±1	22±1
Klimaraum/Normal Klima	64±1	22±1
NaCl	74±1	22±1
NH ₄ H ₂ PO ₄	93±1	22±1

2.3 Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit ϕ ist definiert als Verhältnis des tatsächlich vorhandenen Dampfdrucks p_D zum Sättigungsdruck p_s bei gleicher Temperatur.

Formel 2-1

$$\phi = \frac{p_D}{p_s} \cdot 100 \text{ in } (\%),$$

wobei p_D Partialdruck des Wasserdampfes,
 p_s Sättigungsdruck.

2.4 Rohdichte

Die Rohdichte von Holz ρ ist der Quotient aus der Masse m und dem Volumen V der Probe einschliesslich des Porenvolumens. Da die Rohdichte des Holzes vom Feuchtigkeitsgehalt abhängt, ist der Feuchtigkeitsgehalt zum Zeitpunkt der Rohdichtebestimmung anzugeben (DIN 52 182, 1976).

Die Rohdichte nach Lagerung im Normalklima (DIN 50 014, 1985) wird als Normal-Rohdichte bestimmt:

Formel 2-2

$$\rho_N = \frac{m_N}{V_N} \text{ in } g/cm^3,$$

wobei m_N Masse der normalklimatisierten Probe in g ,

V_N Volumen der normalklimatisierten Probe in cm^3 .

Die Versuchsproben werden dem Normalklima ausgesetzt (Normal-Rohdichte), resp. in drei Stufen (40°C, 70°C und 103°C) darrgetrocknet und die Masse mittels einer elektronischen Waage (Mettler AG, Schweiz) bestimmt. Das Einlesen der Massenwerte in einen Computer erfolgt mit dem Programm WAAGMA (POPPER 1991). Die Abmessungen werden mittels digitaler Messuhr (Digimatic, Mitutoyo, Japan), resp. digitalem Messschieber (Digimatic, Mitutoyo, Japan) auf ± 0.02 mm genau ermittelt, in einen Datenlogger (Mitutoyo DT10, Japan) eingelesen und mit Hilfe des Programms LOGGMA (POPPER 1991) in einen Computer übertragen und dort ausgewertet.

2.5 Feuchtigkeitsgehalt

Der prozentuale Feuchtigkeitsgehalt der Probe u ist das Verhältnis zwischen der Masse des in der Probe enthaltenen Wassers und der Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Probe. Für den Feuchtigkeitsgehalt gilt nach DIN 52 183 (1977):

Formel 2-3

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ in } \%,$$

wobei m_u Masse der feuchten Probe in g ,

m_0 Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Probe in g .

2.6 Feuchteverformung

2.6.1 Lineares Quellmass

Das Quellmass α ergibt sich bei Quellung vom darrgetrockneten auf den feuchten Zustand des Materials. Je nachdem für welche Richtung (Tangentialrichtung TG , Radialrichtung RD) und welchen Feuchtigkeitsgehalt u der Versuchsprobe die Ausmasse a ermittelt werden, unterscheidet man zwischen dem tangentialen α_{TG_u} und dem radialen α_{RD_u} Quellmass.

Formel 2-4

$$\alpha_{TG_u} = 100 \cdot \frac{(a_{TG_u} - a_{TG_0})}{a_{TG_0}} \text{ in \%}$$

Formel 2-5

$$\alpha_{RD_u} = 100 \cdot \frac{(a_{RD_u} - a_{RD_0})}{a_{RD_0}} \text{ in \%}$$

Das transversale Quellmass α_{Trans} wird als Summe aus dem tangentialen und dem radialen Quellmass definiert:

$$\alpha_{Trans,u} = \alpha_{TG_u} + \alpha_{RD_u} \text{ in \%}$$

wobei a_{TG_u} Tangentialabmessung der Probe bei Materialfeuchte u ,
 a_{TG_0} Tangentialabmessung der darrtrockenen Probe,
 a_{RD_u} Radialabmessung der Probe bei Materialfeuchte u ,
 a_{RD_0} Radialabmessung der darrtrockenen Probe.

2.6.2 Differentielle Quellung

Die Holzwerkstoffe werden in der Praxis sehr oft nach der differentiellen Quellung q qualifiziert. Diese ist gemäss DIN 52 184 (1979) als das prozentuale Quellmass der Probe je 1% Holzfeuchtigkeitsänderung wie folgt definiert:

Formel 2-6

$$q = \frac{a_F - a_T}{a_0 \cdot (u_F - u_T)} \cdot 100,$$

wobei q die differentielle Quellung in %/%,

a_F Ausmass der Probe im feuchten Klima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes in mm,

a_T Ausmass der Probe im trockenen Klima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes in mm,

a_0 Ausmass der Probe im darrtrockenen Zustand in mm,

u_F Feuchtigkeitsgehalt der Probe im feuchten Klima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes in %,

u_T Feuchtigkeitsgehalt der Probe im trockenen Klima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes in %.

Als feuchtes Klima wurde hier die relative Luftfeuchtigkeit von 93% bei einer Temperatur von 22°C und als trockenes Klima die relative Luftfeuchtigkeit von 44% bei einer Temperatur von 22°C gewählt.

Für die Bestimmung der Feuchteverformung werden die Versuchsproben den genau definierten Klimaten (siehe Tabelle 2.1) bis zum Erreichen der jeweiligen Gleichgewichtsfeuchtigkeit ausgesetzt und anschliessend die Länge, Breite und Dicke der Proben ermittelt. Anschliessend werden die Proben bei $103 \pm 2^\circ\text{C}$, bis zur Gleichgewichtskonstanz getrocknet, wobei diese Temperatur in drei Stufen (40°C, 70°C und 103°C) innerhalb von 48 Stunden allmählich einzustellen ist. Die Abmessungen werden mittels digitalen Messuhren (Digimatic, Mitutoyo, Japan), resp. dem Messschieber (Digimatic, Mitutoyo, Japan) auf ± 0.02 mm genau ermittelt, in einen Datenlogger (Mitutoyo DT10, Japan) eingelesen und mit Hilfe des Computerprogramms LOGGMA (POPPER 1991) auf den Computer übertragen und dort ausgewertet.

2.7 Anisotropiekoeffizient

Das Holz ist ein anisotropes Material. Es verformt sich bei Feuchteeinwirkung nicht in allen anatomischen Richtungen gleich stark. Die tangentiale, radiale und axiale Feuchteverformung steht zueinander im Verhältnis 2:1:0,1. Das prozentuale Verhältnis tangentialer α_{TG} zu radialer α_{RD} Quellung wird als Anisotropiekoeffizient A bezeichnet:

Formel 2-7

$$A = \frac{\alpha_{TG}}{\alpha_{RD}}$$

2.8 Dimensionsstabilität

Die Feuchteverformung von Holz und Holzwerkstoffen verursacht meistens Schwierigkeiten in der Holzindustrie. Seit langem versucht man das Holz zu vergüten, indem man die Quellung und Schwindung vermindert. Als das Mass der Vergütung verwendet man den so genannten Dimensionsstabilisierungseffekt DS oder auch ASE (Anti Swelling Efficiency), der folgendermassen definiert ist:

Formel 2-8

$$DS\% = \frac{(\alpha_{UNB} - \alpha_{BEH})}{\alpha_{UNB}} \cdot 100,$$

wobei α_{UNB} Volumen- resp. Transversal-Quellung des unbehandelten Materials in %,

α_{BEH} Volumen- resp. Transversal-Quellung des behandelten Materials in %.

2.9 Wasserdampfsorption

Für die Charakterisierung der Wechselwirkung zwischen dem Versuchsmaterial und dem Wasser, resp. dem Wasserdampf, wurde das Hailwood-Horrobin Sorptionsmodell (1946) verwendet. Das Hailwood-Horrobin Sorptionsmodell (weiter als HH-Sorptionsmodell) basiert auf der Annahme, dass das Wasser bei der Wasserdampfsorption durch Lignocellulosen als einfache Lösung und als Hydrat der Lignocellulosen existiert. Es wird weiter angenommen, dass die sorbierte Schicht, die aus nicht hydratisierten und hydratisierten Lignocellulosen sowie aus freiem, flüssigem Wasser besteht, eine ideale, feste Lösung bildet. Durch das HH-Modell lassen sich noch weitere Grössen schätzen, so die Unzugänglichkeit der sorptiv aktiven Stellen des Sorbens zum Sorbat (Z), ferner das hypothetische Molekulargewicht des Sorbens (M_p). Für die experimentell schwer zu bestimmende Fasersättigungsfeuchtigkeit (U_{FS}) lässt sich eine Schätzgrösse errechnen. Weiter wird das monomolekular (U_m) und das polymolekular (U_p) gebundene Wasser durch das HH-Sorptionsmodell ermittelt. Die Berechnung der aus dem HH-Sorptionsmodell abgeleiteten Grössen erfolgte mit dem Computerprogramm HHM28 (Popper, 1982).

3 Resultate und Diskussion

3.1 Sorptionseigenschaften

3.1.1 *Pinus radiata*

Aus der Sorptionsanalyse nach Hailwood-Horrobin kann man entnehmen, dass die **Wärmebehandlung bei 100°C** nur ganz geringe Auswirkung auf das Sorptionsverhalten des Holzes ausübt. Der Verlauf der Sorptionskurven des unbehandelten und des wärmebehandelten Holzes bei 100°C unterscheiden sich nur unwesentlich (Abbildungen 3-1 bis 3-3). Nur gerade im Bereich der Kapillarkondensation zeigt das wärmebehandelte Holz eine kleine Herabsetzung des Sorptionsvermögens. Aus der Tabelle 3-1 lässt sich herauslesen, dass sich die sorptiv aktive Oberfläche, die Unzugänglichkeit der Sorptionsstellen zum Sorbat, das hypothetische Molekulargewicht des Sorbens und das monomolekulare gebundene Wasser durch die Wärmebehandlung bei 100°C praktisch nicht verändert hat. Die geringe Herabsetzung der Fasersättigungsfeuchte ist lediglich auf die Veränderung des polymolekulare gebundenen Wassers zurückzuführen.

Die **Wärmebehandlung bei 150°C und 200°C** bewirkt sowohl eine Herabsetzung des monomolekulare als auch des polymolekulare gebundenen Wassers gegenüber dem unbehandelten Holz. Die sorptiv aktive Oberfläche geht mit der Wärmebehandlung zurück. Die Unzugänglichkeit der Sorptionsstellen und das hypothetische Molekulargewicht nehmen zu. Dies deutet auf einen gewissen Abbau des Holzes hin. In unserem Sorptionsmodell kann man die Unzugänglichkeit der sorptiv aktiven Stellen des Sorbens mit der Kristallinität der Cellulose in Verbindung setzen. Demnach steigt der kristalline Anteil der Cellulose mit der Behandlungstemperatur von 150°C bis 200°C stetig an. Die Erklärung für dieses Phänomen muss man in der brownischen Molekularbewegung suchen. Mit der erhöhten Temperatur kommen die Molekülketten der amorphen Cellulose einander immer näher bis zwischen ihnen halbchemische oder chemische Bindungen entstehen. Die Porenstruktur wird mit der Temperatur von 150°C und höher ebenfalls verändert, was die Verminderung des polymolekulare gebundenen Wassers zeigt. Mit verminderter Porenstruktur und Sorptionsfähigkeit steigt das hypothetische Molekulargewicht des Sorbens.

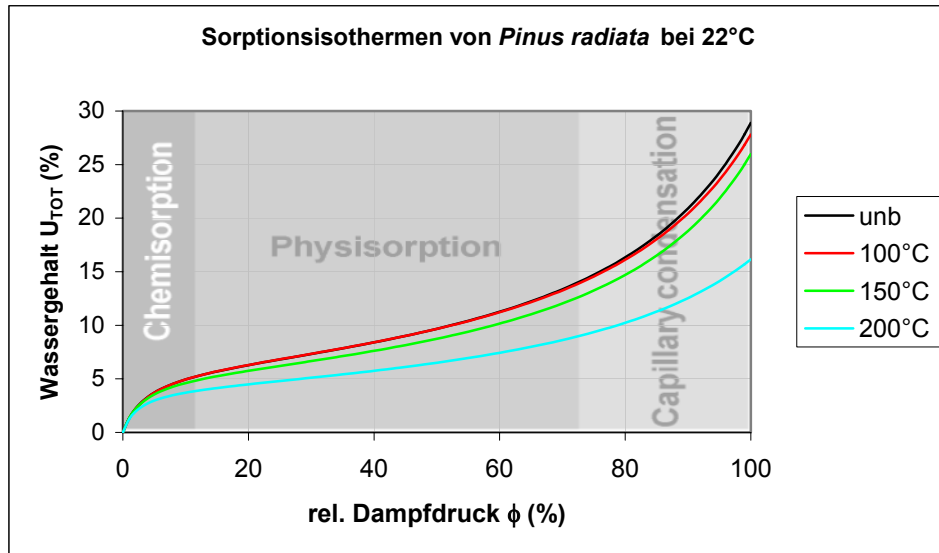


Abbildung 3-1: Sorptionsisothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Pinus radiata*) bei 22°C

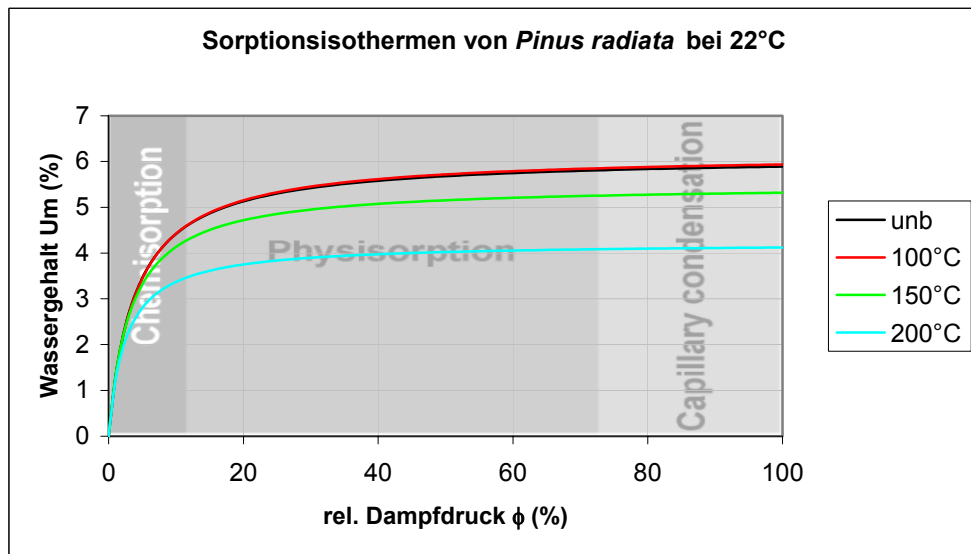


Abbildung 3-2: Das monomolekulare gebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Pinus radiata*) bei 22°C

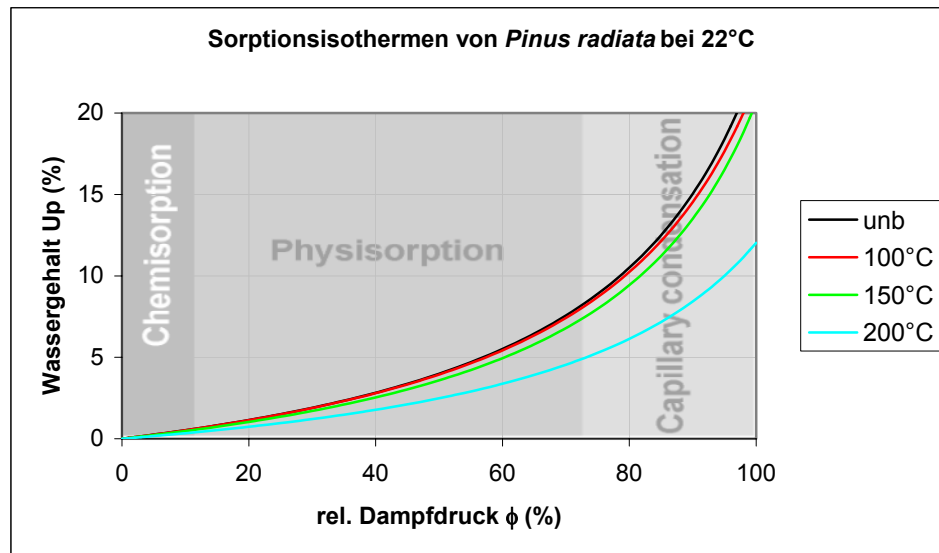


Abbildung 3-3: Das polymolekularegebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Pinus radiata*) bei 22°C

Tabelle 3-1: Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und wärmebehandelte Holz (*Pinus radiata*) bei Fasersättigung

Behandlungsart	Σ	Z	Mp	U_{FS}	U_P	U_m
unbehandelt	209	45	294	30.4	24.3	6.1
100°C	210	45	292	30.2	24.2	6.1
150°C	188	51	328	27.4	21.9	5.5
200°C	146	62	426	16.9	12.6	4.3

- Um berechneter Wassergehalt in der monomolekularen Schicht beim rel. Dampfdruck $\phi = 100\%$,
- Up berechneter Wassergehalt in der polymolekularen Schicht beim rel. Dampfdruck $\phi = 100\%$,
- U_{TOT} berechnete Gleichgewichtsfeuchtigkeit des Sorbens (total sorbiertes Wasser) in %,
- U_{FS} berechneter Wassergehalt bei Fasersättigung ($\phi = p/p_S=100\%$) in %,
- Σ sorptiv aktive Oberfläche des Sorbens in m^2/g ,
- Z Sorbatzuganglichkeit des Sorbens in %
- Mp hypothetisches Molekulargewicht des Sorbens

3.1.2 *Pseudotsuga menziesii*

Aus dem Verlauf der Sorptionskurven von Douglasienholz (Abbildungen 3-4 bis 3-6) kann man herauslesen, dass bereits die 24 Stunden dauernde Wärmebehandlung von 100°C eine Herabsetzung des Sorptionsvermögens im gesamten hygroskopischen Bereich bewirkt. Die Verminderung der Sorptionskapazität durch Wärmebehandlung bei 100°C und 150°C unterscheidet sich nur unwesentlich. Der Unterschied

zwischen der Behandlung bei 100°C und 150°C zeigt sich in der Holz/Wasser-Interaktion. Das polymolekulargebundene Wasser bei 100°C weist praktisch keine Veränderung gegenüber dem unbehandelten Holz auf, so dass die Herabsetzung des Sorptionsvermögens nur auf das monomolekulargebundene Wasser zurückzuführen ist. Bei 150°C kann man bereits eine geringe Herabsetzung des polymolekulargebundenen Wassers feststellen, was auf eine Veränderung der Porenstruktur des Holzes hindeutet. Erst ab 200°C ist ein deutlicher Verlust an Sorptionskapazität im Bereich des monomolekular- als auch des polymolekulargebundenen Wassers zu verzeichnen.

Betrachtet man den Wassergehalt bei Fasersättigung (siehe Tabelle 3-2) ändert sich bei 100°C gegenüber unbehandeltem Holz nichts. Die U_p und U_{FS} -Werte sind beim unbehandelten und beim 100°C behandelten Holz identisch. Der niedrigere Wert des Z - und Σ -Wertes lassen die Vermutung zu, dass es zu einer gewissen Öffnung der Porenstruktur sowie zum Verlust an Kristallinität gekommen ist. Das monomolekular-, das polymolekular- und das gesamte bei Fasersättigung gebundene Wasser des bei 150°C und 200°C behandelten Holzes weist eine Herabsetzung gegenüber unbehandeltem Holz aus. Die Kristallinität bleibt bei 150°C-Behandlung unverändert, steigt hingegen bei 200°C-Behandlung.

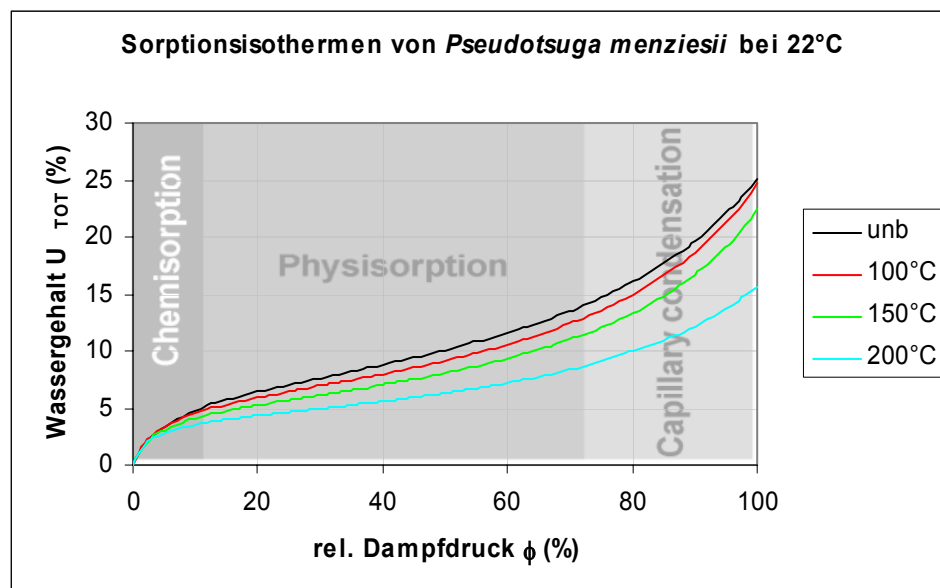


Abbildung 3-4: Sorptionsisothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Pseudotsuga menziesii*) bei 22°C

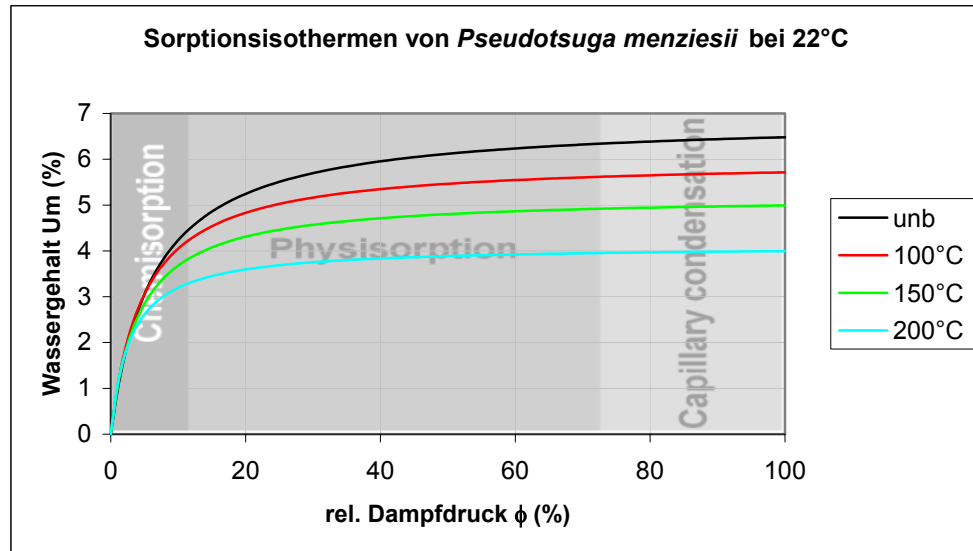


Abbildung 3-5: Das monomolekulargebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Pseudotsuga menziesii*) bei 22°C

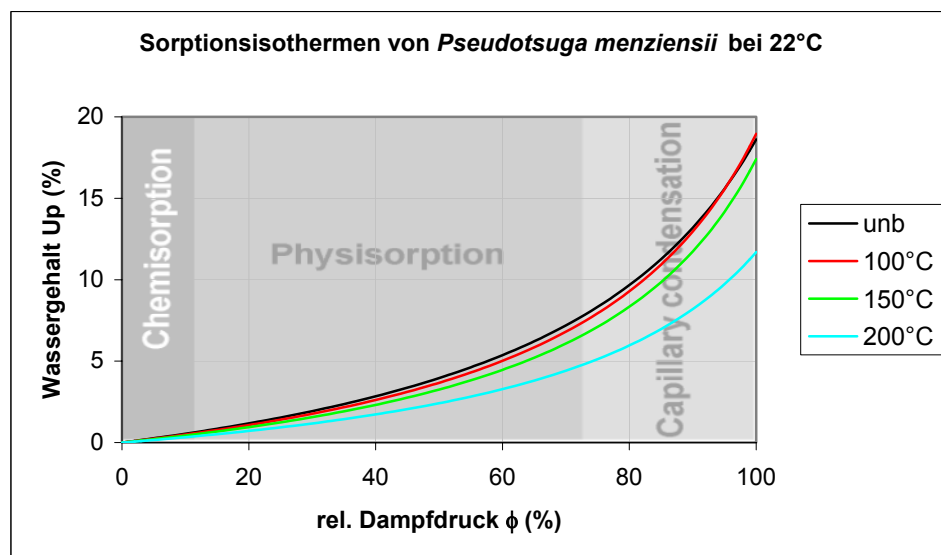


Abbildung 3-6: Das polymolekulargebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Pseudotsuga menziesii*) bei 22°C

Tabelle 3-2: Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und das wärmebehandelte Holz (*Pseudotsuga menziesii*) bei Fasersättigung

Behandlungsart	Σ	Z	Mp	U _{FS}	U _P	U _m
unbehandelt	209	45	294	30.4	24.3	6.1
100°C	210	45	292	30.2	24.2	6.1
150°C	188	51	328	27.4	21.9	5.5
200°C	146	62	426	16.9	12.6	4.3

3.1.3 *Laurelia sempervirens*

Diese Holzart reagiert besonders empfindlich auf die Wärmebehandlung. Wie aus dem Verlauf der Sorptionsisothermen hervorgeht (Abbildungen 3-7 bis 3-9), ist bereits nach 24-stündiger Erwärmung bei 100°C eine Herabsetzung des Wasserdampf-Sorptionsvermögens festzustellen. Die Wärmebehandlung bei 150°C und 200°C zeigt einen weiteren Verlust an unimolekularer als auch polymolekularer Sorptionskapazität gegenüber dem unbehandelten Holz.

Die Fasersättigungswerte (Tabelle 3-3) deuten darauf hin, dass aufgrund durchgeführten Wärmebehandlungen eine kontinuierliche Verminderung der sorptiv aktiven Oberfläche Σ , eine Steigerung des hypothetischen Molekulargewichts M_p , eine Erhöhung der Cellulose-Verkettung $Z\%$, eine Verminderung des U_m - sowie des U_{FS} -Wertes stattgefunden haben. Das polymolekular gebundene Wasser U_p bei 100° und 150°C lässt keine Differenzierung zu. Die Erwärmung bei 200°C zeigt hingegen eine deutliche Herabsetzung des U_p -Wertes.

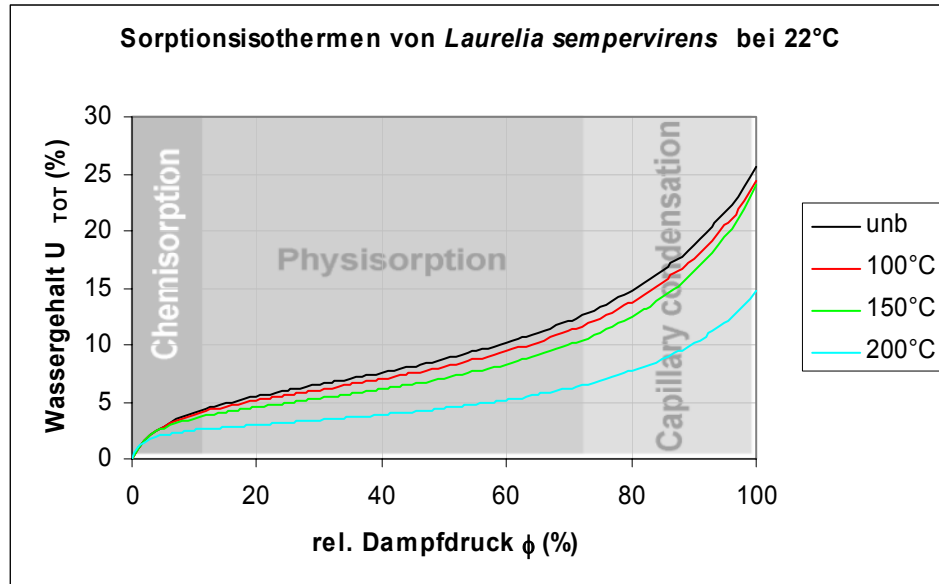


Abbildung 3-7: Sorptionsisothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Laurelia sempervirens*) bei 22°C

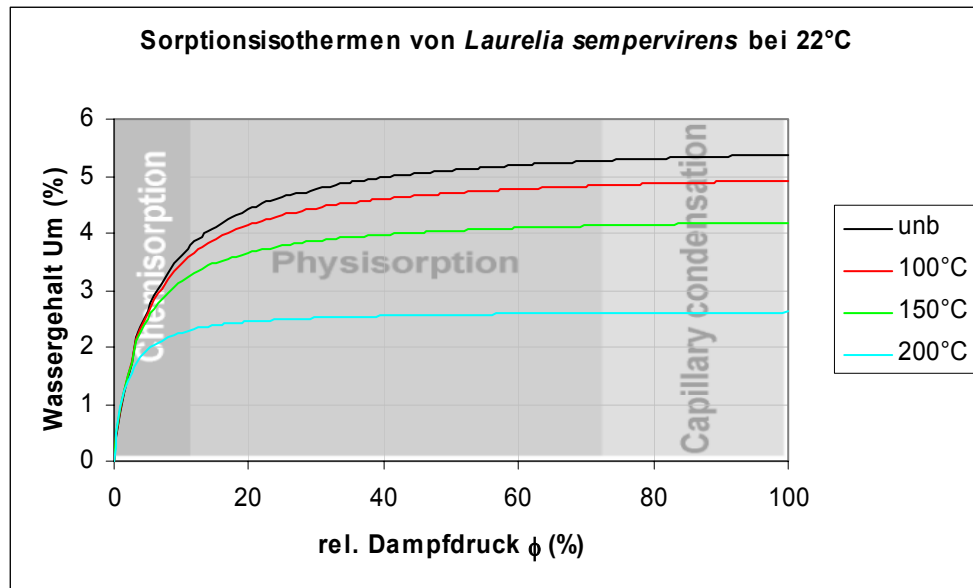


Abbildung 3-8: Das monomolekulare gebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Laurelia sempervirens*) bei 22°C

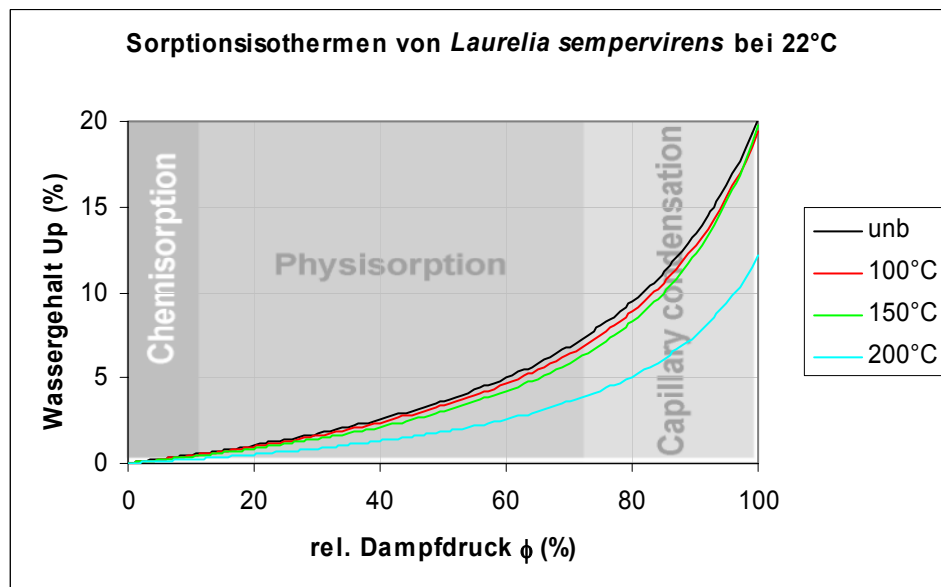


Abbildung 3-9: Das polymolekulare gebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Laurelia sempervirens*) bei 22°C

Tabelle 3-3: Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und wärmebehandelte Holz (*Laurelia sempervirens*) bei Fasersättigung

Behandlungsart	Σ	Z	Mp	U _{FS}	U _P	U _m
unbehandelt	191	49	316	25.5	20.2	5.4
100°C	174	54	349	24.4	19.4	4.9
150°C	148	61	414	24.0	19.7	4.2
200°C	93	76	676	14.7	12.1	2.6

3.1.4 *Castanea sativa*

Das Kastanienholz zeigt in Bezug auf den Verlauf der gesamten Sorptionsisothermen eine klare Differenzierung über den gesamten hygroskopischen Bereich zwischen dem unbehandelten und dem bei 100°C, 150°C und 200°C behandelten Holz, indem die Wasserdampf-Sorptionsfähigkeit stetig sinkt (Abbildung 3-10 bis 3-12).

Die nach dem Hailwood-Horrobin Modell berechneten Gleichgewichtsfeuchtigkeiten bei Fasersättigung für die monomolekulare- (U_m), polymolekulare- (U_p) und die totale Sorbataufnahme (U_{FS}) sowie die entsprechenden Werte der sorptiv aktiven Sorbensoberfläche Σ , der Unzugänglichkeit des Sorbens zum Sorbat (Z) und das hypothetische Molekulargewicht des Sorbens (M_p) sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst. Aus der Tabelle geht hervor, dass die U_m -, U_p und die U_{FS} -Werte mit steigender Behandlungstemperatur immer mehr abnehmen. Die sorptiv aktive Oberfläche Σ nimmt mit der steigenden Behandlungstemperatur ebenfalls ab während das hypothetische Molekulargewicht M_p zunimmt, was auf die temperaturbedingte Strukturänderung des Holzes hindeutet. Die Z -Werte deuten darauf hin, dass die Verkettung der Cellulose mit steigender Temperatur begünstigt wird.

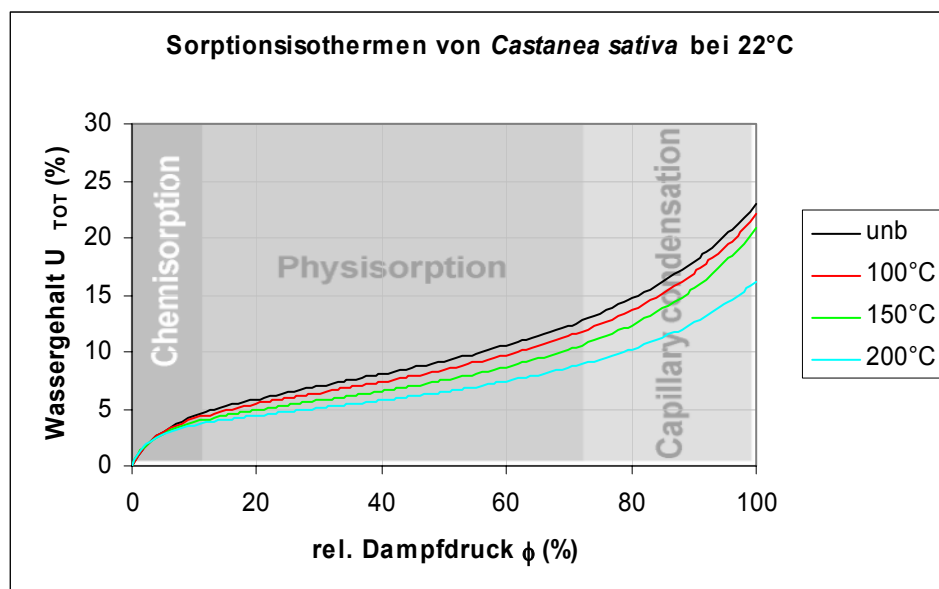


Abbildung 3-10: Sorptionsisothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Castanea sativa*) bei 22°C

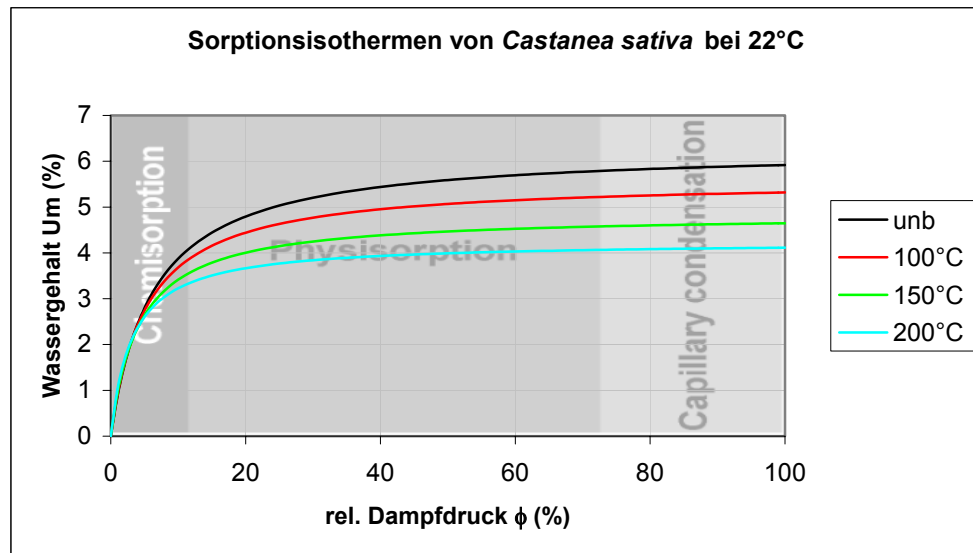


Abbildung 3-11: Das monomolekulare gebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Castanea sativa*) bei 22°C

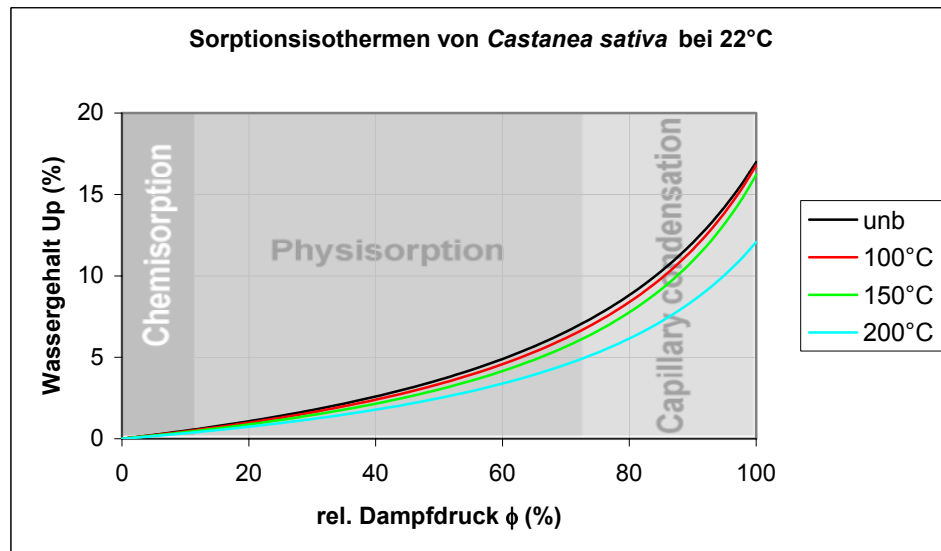


Abbildung 3-12: Das polymolekulare gebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Castanea sativa*) bei 22°C

Tabelle 3-4: Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und wärmebehandelte Holz (*Castanea sativa*) bei Fasersättigung

Behandlungsart	Σ	Z	Mp	U_{FS}	U_P	U_m
unbehandelt	210	43	286	22.9	17.0	5.9
100°C	189	50	322	22.1	16.8	5.3
150°C	165	56	372	20.9	16.2	4.7
200°C	146	62	424	16.2	12.1	4.1

3.1.5 *Quercus robur*

Der Verlauf der unbehandelten und wärmebehandelten Sorptionsisothermen von Eichenholz (Abbildungen 3-13 bis 3-15) deutet darauf hin, dass die 24-stündige Behandlung bei 100°C praktisch keine Änderung gegenüber dem unbehandelten Holz aufweist. Erst ab 150°C macht sich eine Herabsetzung des Wasserdampf-Sorptionsvermögens und zwar bei monomolekular- als auch bei polymolekulargebundenem Wasser bemerkbar.

Die nach dem HH-Modell berechneten Werte bei Fasersättigungsfeuchtigkeit (Tabelle 3-5) zeigen eine kontinuierlich abnehmende Tendenz des U_p - und U_{FS} -Wertes zwischen unbehandeltem bis zu bei 200°C behandeltem Holz. Der U_m -Wert bei 100°C veränderte sich gegenüber demjenigen des unbehandelten Holzes nicht. Dem entsprechend haben sich auch die Σ -, Z - und Mp -Werte bei 100°C kaum verändert. Ab 150°C sinkt vor allem der U_m - und der Σ -Wert und simultan steigt auch der Z - und der Mp -Wert. Der U_p -Wert bei 150°C nimmt nur moderat ab. Daraus lässt sich folgern, dass es ab 150°C zu einer Chemisorptionsänderung mit begleitender Verkettung der Cellulose und Änderung der Porenstruktur des Sorbens gekommen ist.

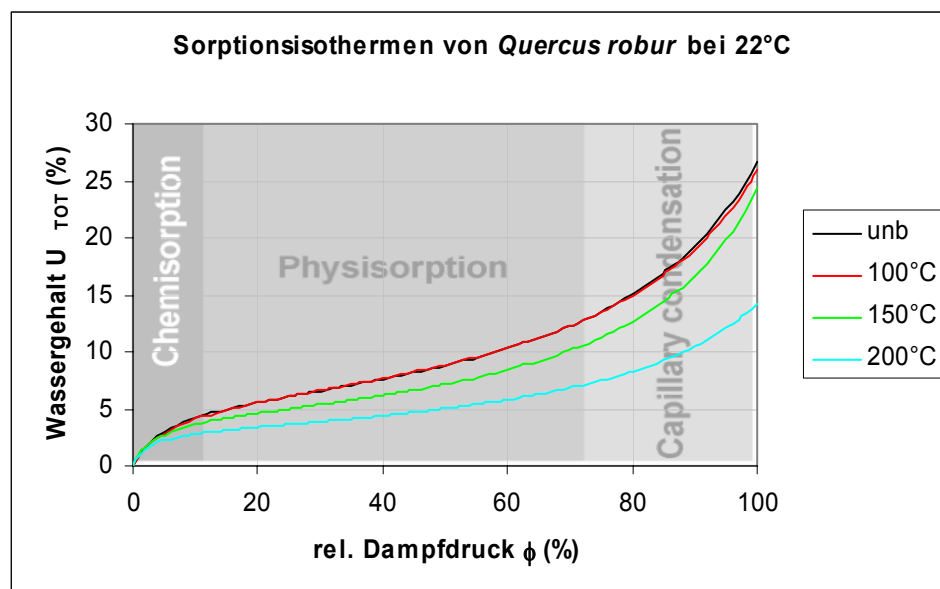


Abbildung 3-13: Sorptionsisothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Quercus robur*) bei 22°C

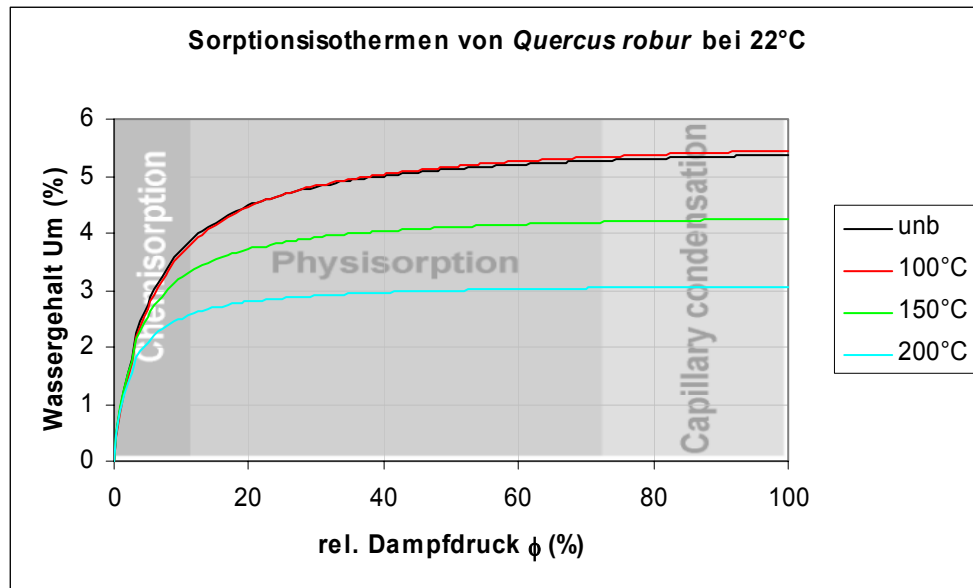


Abbildung 3-14: Das monomolekulare gebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Quercus robur*) bei 22°C

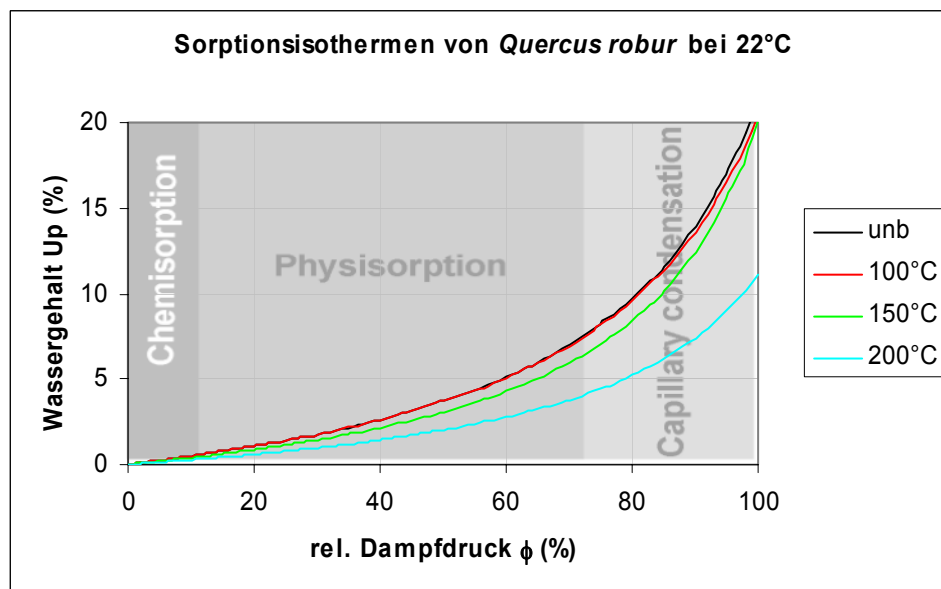


Abbildung 3-15: Das polymolekulare gebundene Wasser von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Quercus robur*) bei 22°C

Tabelle 3-5: Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und wärmebehandelte Holz (*Quercus robur*) bei Fasersättigung

Behandlungsart	Σ	Z	Mp	U_{FS}	U_P	U_m
unbehandelt	190	49	318	26.7	21.3	5.4
100°C	193	48	312	25.9	20.5	5.4
150°C	151	60	408	24.3	20.1	4.3
200°C	109	72	572	14.2	11.2	3.1

3.2 Transversale lineare Quellung entlang der Sorptionsisotherme

In den folgenden Abbildungen ist das transversale Quellmass der jeweiligen Holzart gegen die relative Luftfeuchtigkeit aufgetragen. Diese Darstellungen geben Auskunft über die Feuchteverformung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes im hygroskopischen Bereich bis zur maximal gemessenen Luftfeuchtigkeit. Beim Extrapolieren bis zum Nullpunkt würden alle Holzarten einen sigmoidalen Kurvenverlauf der Funktion $\alpha = f(RH)$ zeigen.

3.2.1 *Pinus radiata*

Aus dem Verlauf der Quellung entlang des hygroskopischen Bereichs (Abbildung 3-16) geht hervor, dass die 24-stündige Wärmebehandlung bei 100°C praktisch keine Änderung der transversalen Quellung bewirkt, erst ab 150°C nimmt die Quellung gegenüber dem unbehandelten Holz merklich ab. Die Wärmebehandlung bei 200°C bewirkt eine deutliche Quellungsverminderung gegenüber dem unbehandelten sowie dem bei 100°C und 150°C behandelten Holz. Mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit folgt die Quellung des bei 100°C behandelten Holzes derjenigen des unbehandelten Holzes. Bei 150°C und bei 200°C ist hingegen mit zunehmender Luftfeuchtigkeit eine markante Abnahme des Quellmasses zu verzeichnen. Im Vergleich zu den übrigen untersuchten Holzarten ist die Feuchteverformung von *Pinus radiata* absolut tiefer.

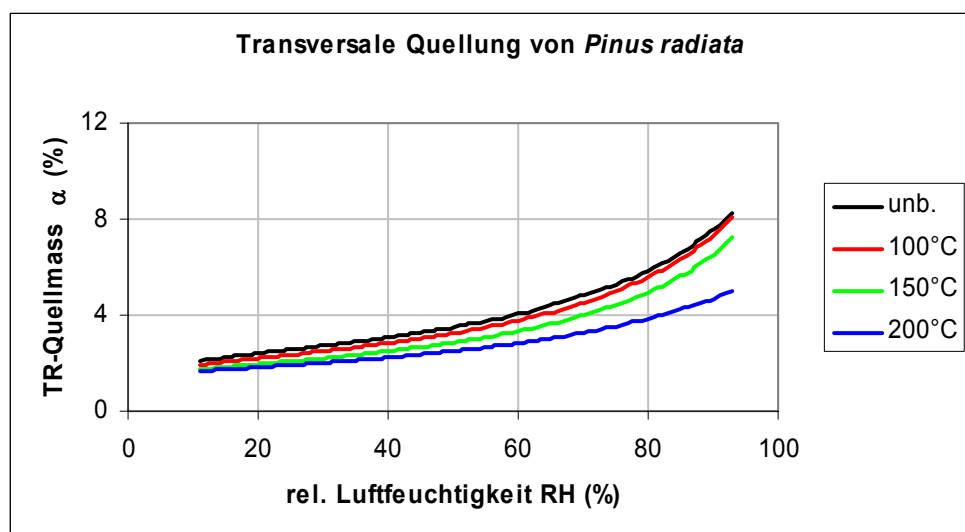


Abbildung 3-16: Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Pinus radiata*) im hygroskopischen Bereich

3.2.2 *Pseudotsuga menziesii*

Die verwendeten Wärmebehandlungen von *Pseudotsuga menziesii* bewirken im ganzen untersuchten Luftfeuchtebereich eine Herabsetzung des transversalen Quellmasses gegenüber dem unbehandelten Holz (Abbildung 3-17). Die Quellungsverminderung folgt der Reihe 100°C, 150°C und 200°C. Es ist hier zu bemerken, dass bei der Behandlungstemperatur von 200°C die Versuchsproben starke Radialrisse aufwiesen, die teilweise bis zum Zerbrechen der Probe führten.

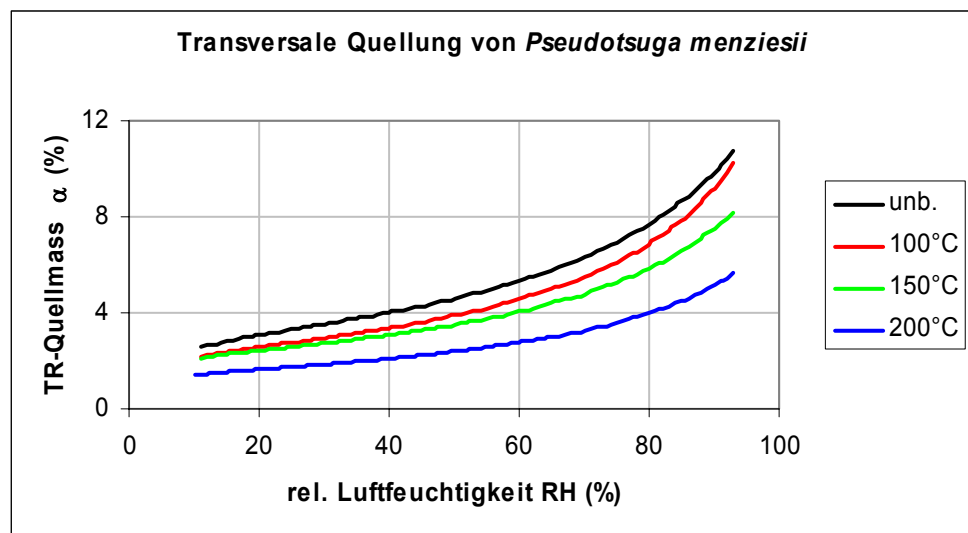


Abbildung 3-17: Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Pseudotsuga menziesii*) im hygroskopischen Bereich

3.2.3 *Laurelia sempervirens*

Der Feuchteverformungsverlauf dieser Holzart zeigt in Bezug auf die Behandlungstemperatur praktisch die gleichen Merkmale wie *Pinus radiata*, d.h. praktisch keine Quellungsverminderung gegenüber dem unbehandelten Holz bei 100°C und eine Herabsetzung der Feuchteverformung mit steigender Temperatur (150°C und 200°C) und Luftfeuchtigkeit (Abbildung 3-18).

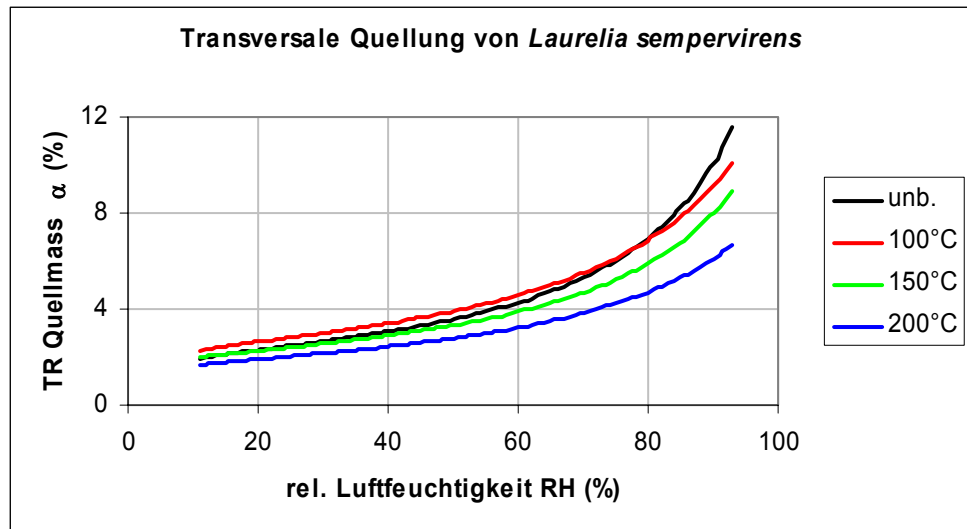


Abbildung 3-18: Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Laurelia sempervirens*) im hygroskopischen Bereich

3.2.4 *Castanea sativa*

Im Vergleich zu den übrigen untersuchten Holzarten zeigt das Kastanienholz eine gewisse Widerstandsfähigkeit gegenüber der Wärmebehandlung. Im unteren Dampfdruckbereich bewirkt die 24-stündige Wärmebehandlung keine Änderung des Quellmasses und erst ab etwa 50% relativer Luftfeuchtigkeit ist eine geringe Feuchteverformungsverminderung des bei 150°C und 200°C behandelten Holzes zu verzeichnen (Abbildung 3-19).

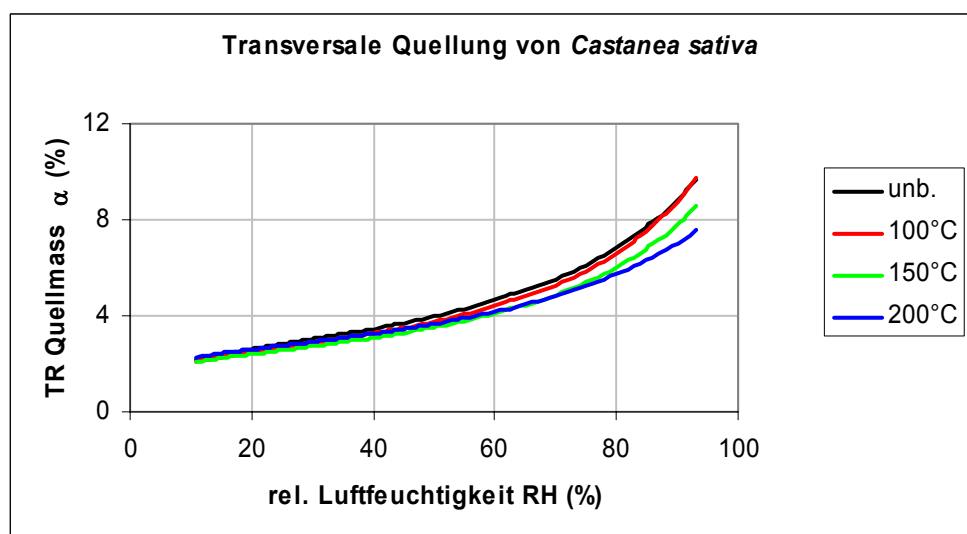


Abbildung 3-19: Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Castanea sativa*) im hygroskopischen Bereich

3.2.5 *Quercus robur*

Die 24-stündige Wärmebehandlung bei 100°C, 150°C und 200°C von *Quercus robur* bewirkt erst ab etwa 40% relativer Luftfeuchtigkeit eine Quellungsverminderung gegenüber dem unbehandelten Holz. Die Wärmebehandlung bei 100°C und 150°C führt zu praktisch der gleichen Herabsetzung des Quellmasses. Die Temperatur von 200°C bewirkt eine weitere Feuchteverformungsverminderung gegenüber dem unbehandelten Holz (Abbildung 3-20).

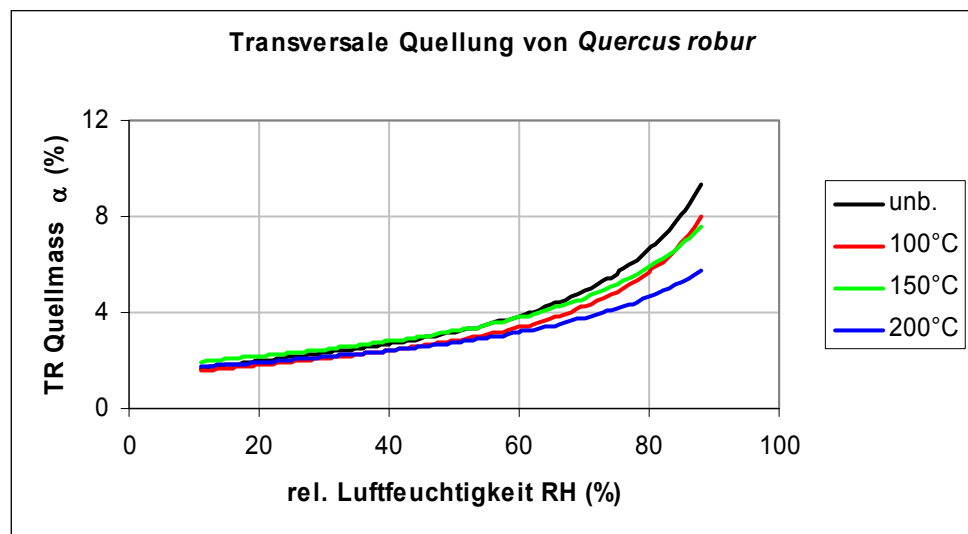


Abbildung 3-20: Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Quercus robur*) im hygroscopischen Bereich

3.3 Differentielle Quellung

Die differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes ist unten tabellarisch (Tabelle 3-6) und graphisch (Abbildungen 3-21 bis 3-25) für alle untersuchten Holzarten dargestellt. Aus diesen Bildern ist ersichtlich, dass der Unterschied zwischen tangentialer und radialer differentieller Quellung in der Reihenfolge *Pinus radiata*, *Pseudotsuga menziesii*, *Castanea sativa*, *Laurelia sempervirens* und *Quercus robur* steigt. Die tangentielle differentielle Quellung ist allgemein empfindlicher auf die Wärmebehandlung als die radiale, wobei sich die tangentielle differentielle Quellung von *Quercus robur* von den übrigen untersuchten Holzarten in den absoluten Werten deutlich absetzt.

Tabelle 3-6: Differentielle Quellung in $q\%/%$ des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes

Holzart	Behandlungsart							
	Tangential				Radial			
	Unb.	100°C	150°C	200°C	Unb.	100°C	150°C	200°C
<i>Pinus radiata</i>	0.23	0.24	0.22	0.29	0.14	0.14	0.15	0.11
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0.32	0.29	0.25	0.28	0.19	0.20	0.19	0.17
<i>Laurelia sempervirens</i>	0.40	0.39	0.38	0.33	0.17	0.13	0.12	0.18
<i>Castanea sativa</i>	0.37	0.37	0.36	0.34	0.13	0.14	0.14	0.16
<i>Quercus robur</i>	0.51	0.52	0.48	0.47	0.19	0.19	0.17	0.23

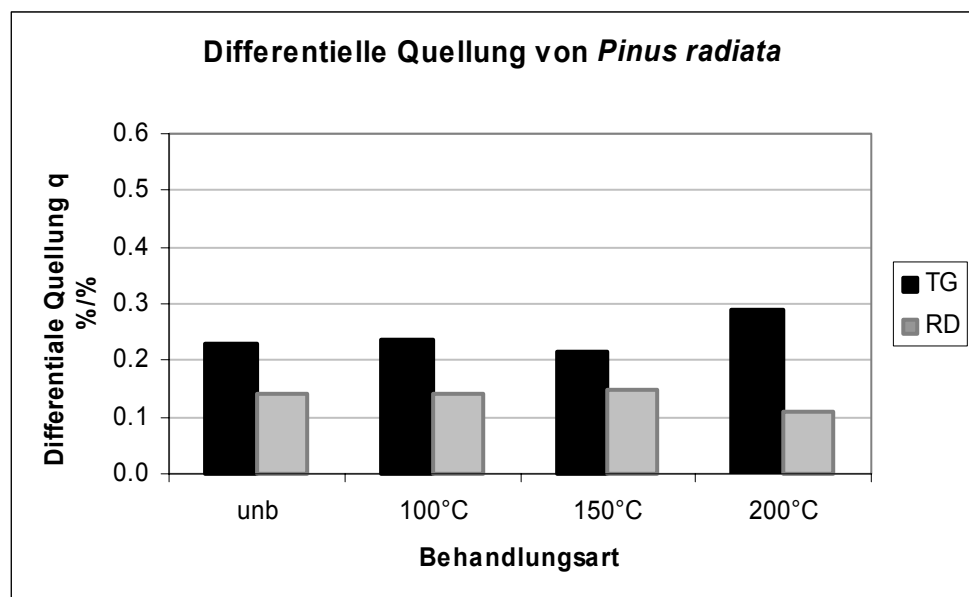


Abbildung 3-21: Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Pinus radiata*)

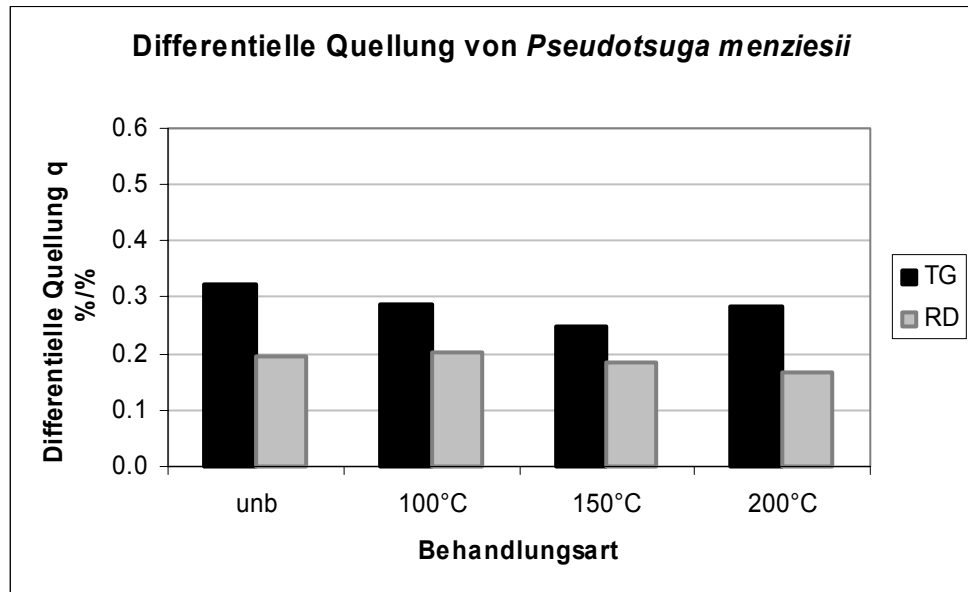


Abbildung 3-22: Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Pseudotsuga menziesii*)

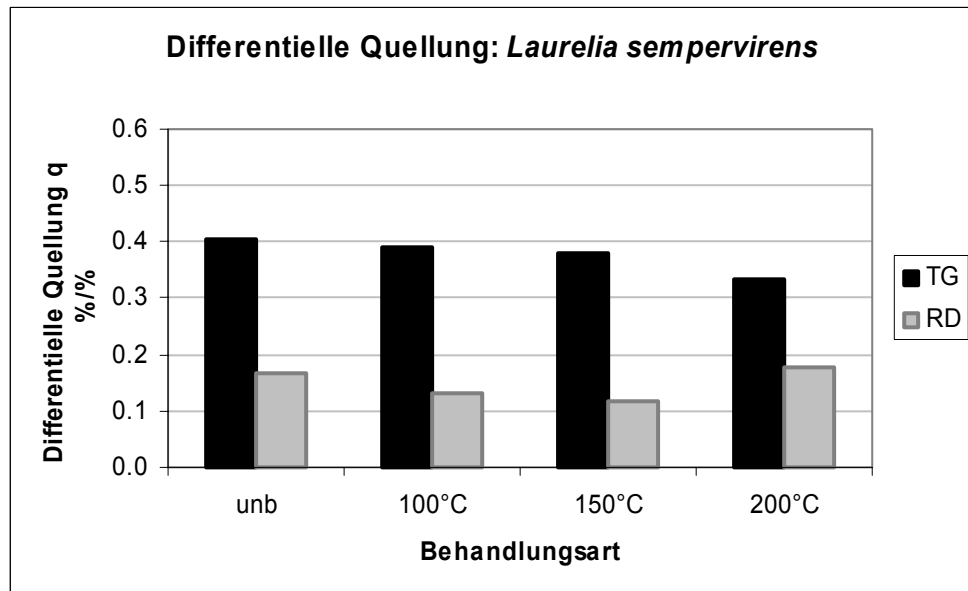


Abbildung 3-23: Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Laurelia sempervirens*)

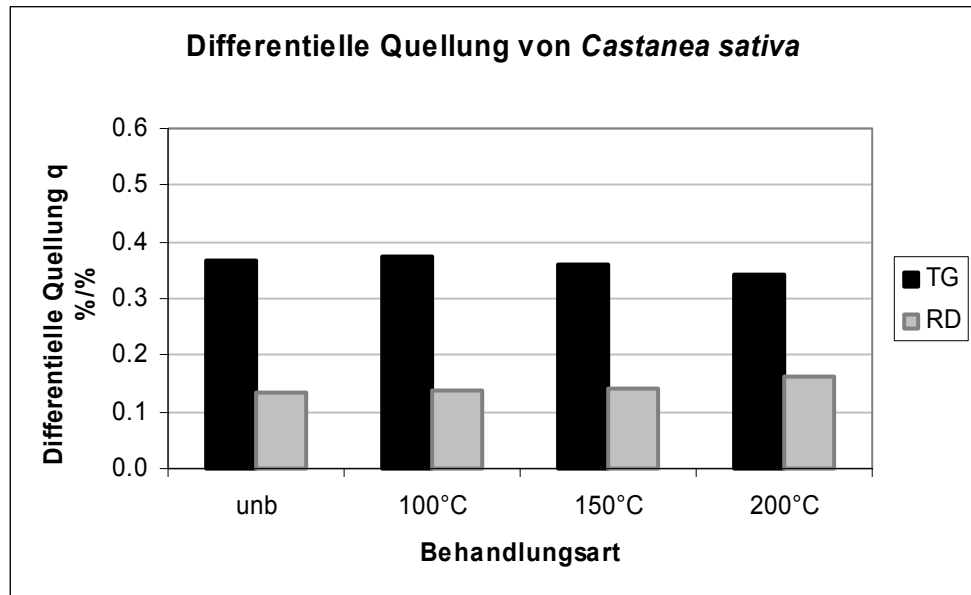


Abbildung 3-24: Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Castanea sativa*)

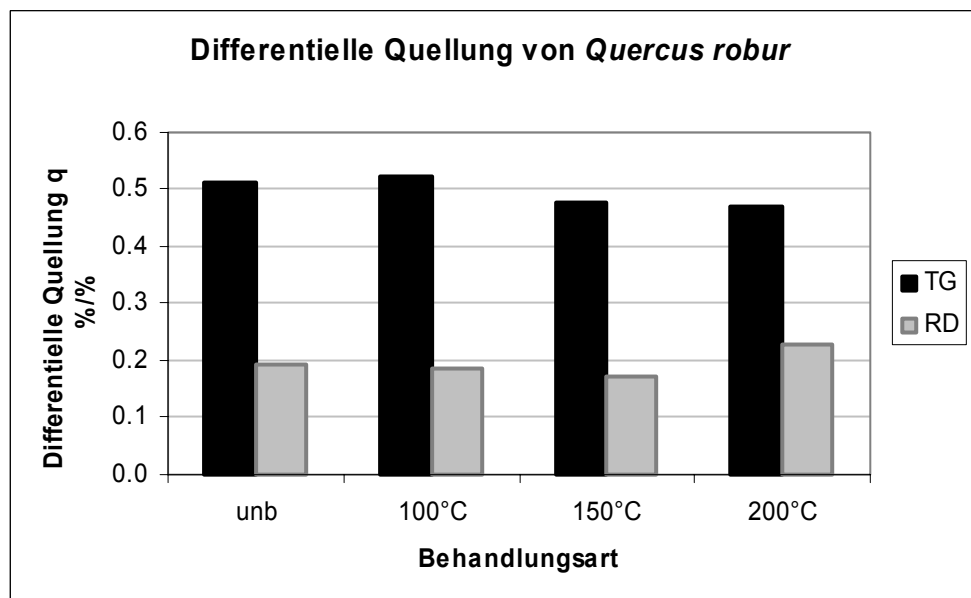


Abbildung 3-25: Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Quercus robur*)

3.4 Anisotropiekoeffizient

Aus Tabelle 3-7 ist zu entnehmen, dass der Anisotropiekoeffizient A von Föhren- und Douglasienholz bei Fasersättigungsfeuchtigkeit (FSP) den Wert $A < 2$ annimmt, die übrigen untersuchten Holzarten (Ausnahme: *Laurelia sempervirens* bei 200°C) hingegen $A \geq 2$ aufweisen. Bis zu 150°C bleibt der Anisotropiekoeffizient A beinahe konstant. Mit Ausnahme von Föhrenholz tendiert der A -Wert bei 200°C leicht abzunehmen.

Tabelle 3-7: Anisotropiekoeffizienten des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes bei Fasersättigungsfeuchtigkeit

Holzart	unbehandelt	100°C	150°C	200°C
<i>Pinus radiata</i>	1.4	1,4	1.3	1.8
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1.5	1.5	1.4	1.4
<i>Laurelia sempervirens</i>	2.2	2.3	2.8	1.8
<i>Castanea sativa</i>	2.6	2.6	2.6	2.3
<i>Quercus robur</i>	2.2	2.0	2.3	2.0

3.5 Dimensionsstabilität (ASE)

Es besteht im hygroskopischen Bereich bis zur Fasersättigungsfeuchtigkeit eine lineare Abhängigkeit zwischen Quellmass und Holzfeuchtigkeit. Extrapoliert man den linearen Verlauf bis zur nach dem HH-Sorptionsmodell berechneten Fasersättigungsfeuchtigkeit, so bekommt man das entsprechende Fasersättigungsquellmass. Dieses Quellmass diene dann zur Berechnung der in Tabelle 3-8 aufgeführten Dimensionsstabilität.

Ausser beim Kastanienholz beträgt die transversale Dimensionsstabilität bei Fasersättigungsfeuchtigkeit bei allen untersuchten Holzarten nach 24-stündiger Wärmebehandlung bei 200°C mehr als 40% und bei 150°C mehr als 14%. Das Kastanienholz zeigt sich dagegen bezüglich einer Dimensionsstabilisierung durch die Wärmebehandlung unempfindlicher. Die transversale Dimensionsstabilität beträgt bei 150°C lediglich 9% und bei 200°C etwa 20% (Tabelle 3-8, Abbildung 3-26).

Tabelle 3-8: Transversale Dimensionsstabilität (ASE%) des Holzes bei Fasersättigungsfeuchtigkeit aufgrund 24-stündiger Wärmebehandlung.

Behandlungs- temperatur	PI	PS	LA	CA	QU
100°C	0.9	1.1	5.0	3.6	5.7
150°C	14.3	19.5	14.4	8.9	15.2
200°C	41.7	46.4	44.2	20.9	43.0

Legende: PI... *Pinus radiata*
 PS.. *Pseudotsuga menziesii*
 LA.. *Laurelia sempervirens*
 CA.. *Castanea sativa*
 QU.. *Quercus robur*

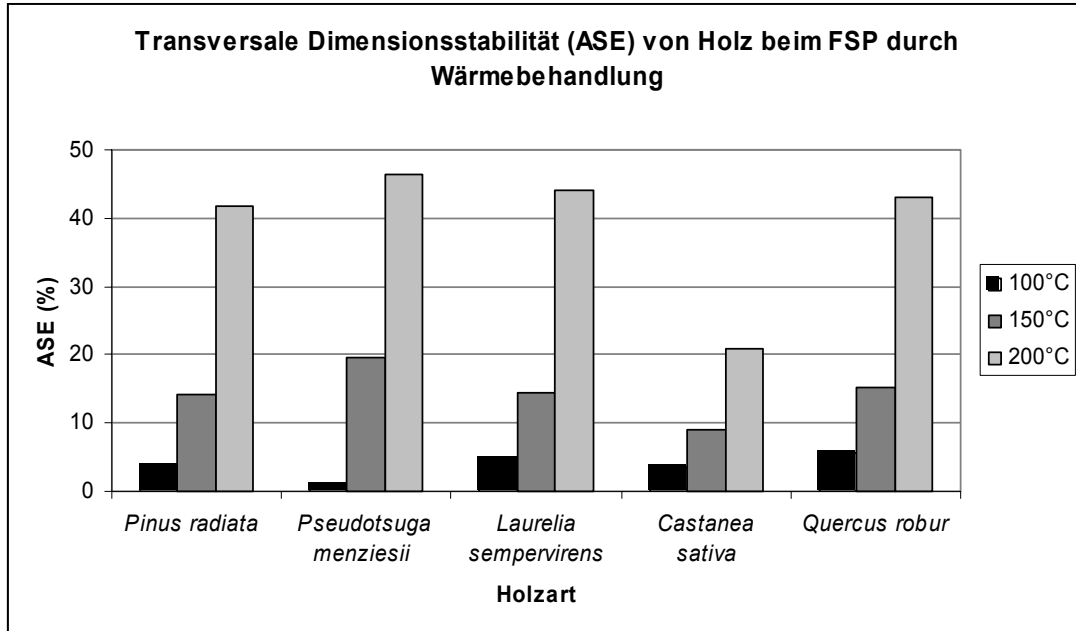


Abbildung 3-26: Transversale Dimensionsstabilität von Holz bei Fasersättigungsfeuchtigkeit (FSP) aufgrund 24-stündiger Wärmebehandlung

3.6 Normal-Rohdichte

Wie aus Tabelle 3-9 und Abbildung 3-27 hervorgeht führt die Wärmebehandlung bei allen untersuchten Holzarten tendenziell zur Verminderung der Normal-Rohdichte. Dies deutet darauf hin, dass durch steigende Temperaturbehandlung allmählich Abbaureaktionen im Holz stattfinden.

Tabelle 3-9: Normal-Rohdichte des Versuchsmaterials in g/cm³

Holzart	unbehandelt	100°C	150°C	200°C
<i>Pinus radiata</i>	0.46	0.48	0.47	0.42
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0.71	0.68	0.67	0.62
<i>Laurelia sempervirens</i>	0.57	0.56	0.54	0.49
<i>Castanea sativa</i>	0.65	0.64	0.63	0.61
<i>Quercus robur</i>	0.76	0.76	0.75	0.69

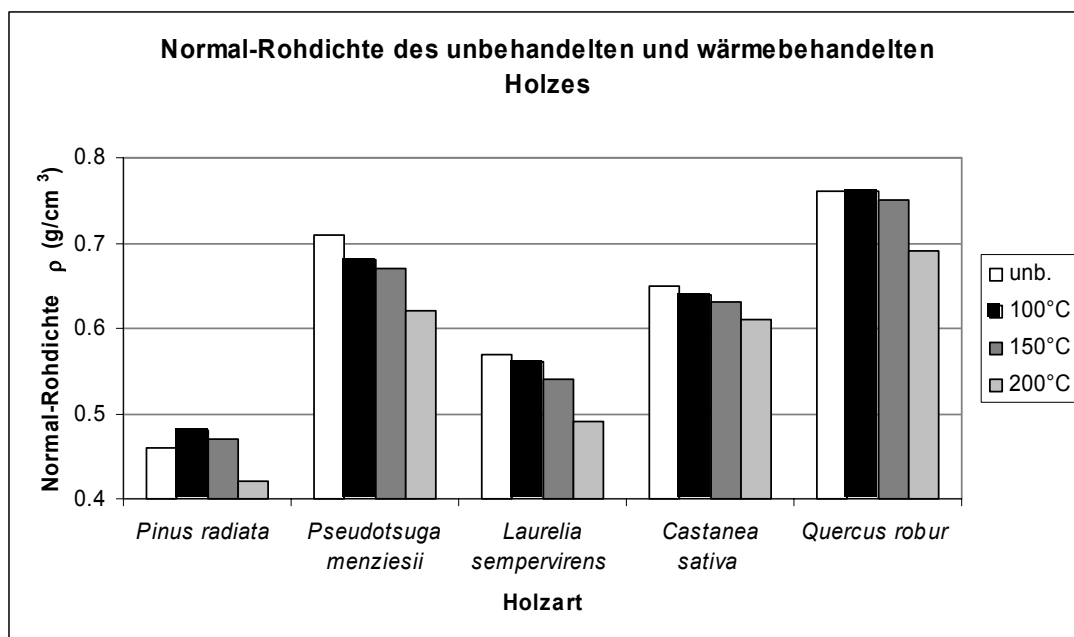


Abbildung 3-27: Einfluss der Behandlungsart auf die Normal-Rohdichte

4 Schlussfolgerungen

Hauptsächliche Träger der hygroskopischen Eigenschaften des Holzes sind Polysaccharide. Durch eine Wärmebehandlung können je nach Temperatur und Umgebungsbedingungen (oxydative resp. nichtoxydative Atmosphäre) chemische (Verwandlung von Hemicellulosen zu Furfuralpolymeren), physikalische (Verhornung der Polysaccharide), physikal-chemische (Verkettung zwischen Hemicellulosen und Cellulose durch Acetalbindungen) und strukturelle Änderungen (Bildung von Wasserstoffbrücken zwischen Cellulose-Cellulose Ketten) angenommen werden. Diese Veränderungen können zu Hygroskopizitäts-, Formstabilitäts- und Durchlässigkeitsänderungen des Holzes führen.

Die hier durchgeführten Untersuchungen an wärmebehandeltem Holz erlauben folgende Schlüsse:

Wasserdampfsorption

- **24-stündige Wärmebehandlung bei 100°C**
 - Bei *Pinus radiata* ist eine geringe Herabsetzung des Wasserdampf-Sorptionsvermögens im Bereich der Kapillarkondensation zu verzeichnen. Die Herabsetzung der Fasersättigungsfeuchte ist lediglich auf die Veränderung des polymolekulargebundenen Wassers zurückzuführen.
 - *Pseudotsuga menziesii* weist eine Herabsetzung des Sorptionsvermögens auf. Diese Verminderung der Sorptionskapazität ist jedoch lediglich auf das monomolekulargebundene Wasser zurückzuführen.
 - *Laurelia sempervirens* reagiert allgemein besonders empfindlich auf die Wärmebehandlung. Es ist bereits eine relativ starke Herabsetzung des Wasserdampf-Sorptionsvermögens gegenüber dem unbehandelten Holz festzustellen.
 - *Castanea sativa* zeigt ebenfalls eine Verminderung in der Wasserdampf-Sorptionsfähigkeit. Die Sorptionsanalyse lässt auf eine Verkettung der Cellulose schließen, die für die Herabsetzung des Sorptionsvermögens verantwortlich gemacht werden kann.
 - Bei *Quercus robur* hat die Wärmebehandlung keinen Einfluss auf das Sorptionsverhalten.

- **24-stündige Wärmebehandlung bei 150°C und 200°C**
 - Die oben erwähnte Wärmebehandlung bewirkt bei ***Pinus radiata*** sowohl eine Herabsetzung des monomolekular- als auch des polymolekulargebundenen Wassers gegenüber dem unbehandelten Holz. Aufgrund der durchgeführten Sorptionsanalyse kann man mit steigender Temperatur von 150°C auf 200°C auf eine ansteigende Kristallinität der Cellulose, eine Porenstrukturänderung und auf einen Abbau des Holzes schliessen.
 - Bei ***Pseudotsuga menziesii*** kann man bereits bei 150°C eine geringe Herabsetzung des polymolekulargebundenen Wassers feststellen, was auf eine Veränderung der Porenstruktur des Holzes hindeutet. Erst ab 200°C ist ein deutlicher Verlust an Sorptionskapazität im Bereich des monomolekular- als auch des polymolekulargebundenen Wassers zu verzeichnen.
 - Bei ***Laurelia sempervirens*** zeigt die Wärmebehandlung bei 150°C und 200°C einen weiteren Verlust an unimolekularer als auch polymolekularer Sorptionskapazität gegenüber dem unbehandelten Holz. Das polymolekular gebundene Wasser lässt bei 100°C und 150°C keine Differenzierung zu. Die Erwärmung bei 200°C zeigt hingegen eine deutliche Herabsetzung des U_p -Wertes.
 - ***Castanea sativa*** zeigt in Bezug auf den Verlauf der gesamten Sorptionsisothermen eine klare Differenzierung über den gesamten hygroskopischen Bereich zwischen dem unbehandelten und dem bei 150°C und 200°C behandelten Holz, indem die Wasserdampf-Sorptionsfähigkeit stetig sinkt. Die Werte der Sorptionsanalyse deuten auf eine temperaturbedingte Strukturänderung des Holzes hin. Mit steigender Temperatur wird auch die Verkettung der Cellulose begünstigt.
 - Bei ***Quercus robur*** macht sich erst ab 150°C eine Herabsetzung des Wasserdampf-Sorptionsvermögens und zwar bei monomolekular- als auch bei polymolekulargebundenem Wasser bemerkbar. Aus der Sorptionsanalyse lässt sich folgern, dass es ab 150°C zur Chemisorptionsänderung mit begleitender Verkettung der Cellulose und Änderung der Porenstruktur des Sorbens gekommen ist.

Transversale lineare Quellung

- Aus dem Verlauf der Quellung von ***Pinus radiata*** entlang des hygroskopischen Bereichs geht hervor, dass die 24-stündige Wärmebehandlung bei 100°C praktisch keine Änderung der transversalen Quellung bewirkt. Erst ab 150°C nimmt die Quel-

lung gegenüber dem unbehandelten Holz merklich ab. Die Wärmebehandlung bei 200°C bewirkt eine deutliche Quellungsverminderung gegenüber dem unbehandelten sowie dem bei 100°C und 150°C behandelten Holz.

- Die angewendeten Wärmebehandlungen an ***Pseudotsuga menziesii*** bewirken im ganzen untersuchten Luftfeuchtebereich eine Herabsetzung des transversalen Quellmasses gegenüber dem unbehandelten Holz. Die Quellungsverminderung folgt der Reihe 100°C, 150°C und 200°C. Es ist hier zu bemerken, dass bei einer Behandlungstemperatur von 200°C die Versuchsprouben Radialrisse aufwiesen, die teilweise bis zum Zerschlagen der Proben führten.
- Der Feuchteverformungsverlauf von ***Laurelia sempervirens*** zeigt in Bezug auf die Behandlungstemperatur praktisch die gleichen Merkmale wie *Pinus radiata*, d.h. praktisch keine Quellungsverminderung gegenüber dem unbehandelten Holz bei 100°C und eine Herabsetzung der Verformung mit steigender Temperatur (150°C und 200°C) und Luftfeuchtigkeit.
- Im Vergleich zu den übrigen untersuchten Holzarten zeigt ***Castanea sativa*** eine gewisse Widerstandsfähigkeit gegenüber einer Wärmebehandlung. Im unteren Dampfdruckbereich bewirkt die 24-stündige Wärmebehandlung keine Änderung des Quellmasses und erst ab etwa 50% relativer Luftfeuchtigkeit ist eine geringe Feuchteverformungsverminderung des bei 150°C und 200°C behandelten Holzes zu verzeichnen.
- Die 24-stündige Wärmebehandlung bei 100°C, 150°C und 200°C von ***Quercus robur*** bewirkt erst ab etwa 40% relativer Luftfeuchtigkeit eine Quellungsverminderung gegenüber dem unbehandelten Holz. Die Wärmebehandlung bei 100°C und 150°C führt zu praktisch der gleichen Herabsetzung des Quellmasses. Die Temperatur von 200°C bewirkt eine weitere Feuchteverformungsverminderung.

Differentielle Quellung

- Der Unterschied zwischen tangentialer und radialer differentieller Quellung steigt in der Reihenfolge *Pinus radiata*, *Pseudotsuga menziesii*, *Castanea sativa*, *Laurelia sempervirens* und *Quercus robur*.
- Die tangentielle differentielle Quellung ist allgemein empfindlicher auf die Wärmebehandlung als die radiale.
- Was die tangentielle differentielle Quellung anbelangt setzt sich *Quercus robur* von den übrigen untersuchten Holzarten in den absoluten Werten deutlich ab.

Anisotropie

- Der Anisotropiekoeffizient A von *Pinus radiata* und *Pseudotsuga menziesii* bei Fasersättigungsfeuchtigkeit (FSP) nimmt den Wert $A < 2$ an, die übrigen untersuchten Holzarten (Ausnahme: *Laurelia sempervirens* bei 200°C) hingegen weisen einen Wert von $A \geq 2$ auf.
- Bis zu 150°C bleibt der Anisotropiekoeffizient A beinahe konstant.
- Mit Ausnahme von *Pinus radiata* tendiert der A -Wert bei 200°C leicht abzunehmen.

Dimensionsstabilität (ASE)

- Ausser bei *Castanea sativa* beträgt die transversale Dimensionsstabilität bei Fasersättigungsfeuchtigkeit bei den übrigen untersuchten Holzarten bei 24-stündiger Wärmebehandlung bei 200°C mehr als 40% und bei 150°C um die 14% und mehr.
- *Castanea sativa* zeigt sich bezüglich einer Feuchteverformungsvergütung aufgrund der Wärmebehandlung unempfindlicher. Die transversale Dimensionsstabilität beträgt bei 150°C lediglich 9% und bei 200°C etwa 20%.

Normal-Rohdichte

- Die Wärmebehandlung führt bei allen untersuchten Holzarten tendenziell zur Verminderung der Normal-Rohdichte. Dies deutet darauf hin, dass durch steigende Temperaturbehandlung allmählich Abbaureaktionen im Holz stattfinden.

5 Literatur

1. BARISKA, M. 1980: Erweichung und Wiederverfestigung des Holzes im Temperaturbereich bis 300°C – gemessen mit Hilfe der Torsions-Schwingungs-Technik. *SAH-Bulletin (1)*: 1-13.
2. BARISKA, M.; Skaar, C.; Davidson, R. W. 1969: Studies of the wood-anhydrous ammonia system. *Wood Sci.* 2(2):65.
3. DIN 52 182. Sep. 1976: Prüfung von Holz. Bestimmung der Rohdichte. Seite 1-2.
4. DIN 52 183. Nov. 1977: Prüfung von Holz. Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. Seite 1-2.
5. DIN 52 184. Mai 1979: Prüfung von Holz. Bestimmung der Quellung und Schwindung. Seite 1-4.
6. DIN 50 014. Jul. 1985: Klimate und ihre technische Anwendung. Normalklimate. Seiten 1-2.
7. ENGER, K. 1937: Neuere Erkenntnisse über die Vergütung der Holzeigenschaften. *Mitt. Fachaussch. Holzfragen.* 18: 2-3.
8. FURUTA, YUUZOU; AIZAWA, HIDEO; YANO, HIROYUKI; NORIMOTO, MISATO. 1997: Thermal-Softening Properties of Water-Swollen Wood. IV: The effect of chemical constituents of the cell wall on the thermal-softening properties of wood. *J. Japan Wood Res. Soc. (Mokuzai Gakkaishi)* 43 (9): 725-730.
9. GERHARDS, C. C. 1982: Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood; an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber* 14 (1): 4-36.
10. GLOS, P.; HENRICI, D. 1991: Längsdruck-E-Modul von Fichtenbauholz im Temperaturbereich bis 150°C. *Holz als Roh- und Werkstoff* 49: S. 298.
11. HANHIJÄRVI, A. 2000: Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part III. Experimental results under drying conditions (mechano-sorptive creep). *Holz als Roh- und Werkstoff* 58: 63-71.
12. HILLIS, W. H. 1984: High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1: General consideration. *Wood Science and Technology* 18: 281-293.

13. Hillis, W. H.; Rozsa, A. N. 1985a: High temperature and chemical effects on wood stability. Part 2. The effect of heat on the softening of radiata pine. *Wood Sci. Technol.* 19(1): 57-66.
14. Hillis, W. H.; Rozsa, A. N. 1985b: High temperature and chemical effects on wood stability. Part 3. The effect of heat on the rigidity and stability of radiata pine. *Wood Sci. Technol.* 19(2): 93-102.
15. HUNTER, A. J.; SUTHERLAND, J. W. 1997: The evaporation of water from wood at high temperatures. *Wood Science and Technology* 31 (2): 73-76.
16. KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. 2002: Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60: 1-6.
17. KEYLWERTH, R. 1966: Temperatur- und Feuchtigkeitsgefälle in Holzbauteilen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 25: 452-454.
18. KININMONTH, J. A. 1976: Bonding in press-dried sheets from high-yield pulps. The role of lignin and hemicelluloses. *Tappi* 62(7):77-80.
19. NAKANO, TAKATO; FURUTA, YUUZOU; YANO, HIROYUKI. 1997: Interpretation of the Temperature Dependence of Relative Change in Elastic Modulus of Wood. *J. Japan Wood Res. Soc. (Mokuzai Gakkaishi)* 43 (7): 532-536.
20. NIEMZ, P.; MATEJAK, M. 1997: Untersuchungen zum Einfluss der thermischen Vorbehandlung auf die Gleichgewichtsfeuchtigkeit von Radiata pine. *Annals of Warsaw Agriculture University* 48: 107-109.
21. ORMAN, H. R. 1955: The response of New Zealand timbers to fluctuations in atmospheric moisture conditions. *Tech. Pap. Forest Res. Inst. N.Z. Forest Ser. No. 8.*
22. PECINA, H. 1978: Zur Aussagefähigkeit von IR-Spektrogrammen über chemische Strukturveränderungen des Holzes mit dem Beispiel thermischer Behandlung. *Holztechnologie* 23: 78-84.
23. PECINA, H.; PAPRZYCKI, O. 1988: Wechselbeziehung zwischen der Temperaturbehandlung des Holzes und seiner Benetzbarkeit. *Holzforschung und Holzverwertung* 40 (1): 5-8.
24. POPPER, R. 1991: Einfluss der Wärme auf physikalische, physikalisch-chemische und chemische Eigenschaften lignocelluloseischer Materialien. *D-WAHO/Holztechnologie, Int. Ber. S. 1-24.*
25. POPPER, R. 1991: Datenerfassungsprogramm LOGGMA. Int. Bericht D-WAHO/ETHZ.
26. POPPER, R.; EBERLE, G. 1992: Einfluss der Heizrate auf die Wärmeausdehnung von Holz im Temperaturbereich zwischen 100°C und 120°C. *Drevarsky vyskum* 134: 27-38.

27. POPPER, R.; EBERLE, G. 1993: Untersuchungen thermomechanischer Eigenschaften des trockenen Holzes. *Drevarsky vyskum* (2): 11-17.
28. SAILER, M.; RAPP, A. O.; LEITHOFF, H.; PEEK, R.-D. 2000: Vergütung von Holz durch Anwendung einer Öl-Hitzebehandlung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58: 15-22.
29. SCHNEIDER, A. 1973: Investigation on the conversion drying of lumber at extremely high temperatures. Part II. *Holz als Roh- und Werkstoff* 31: 198-206.
30. SCHUERCH, C. 1964: Wood Plasticization. *Forest Prod. J.* 16(9): 377.
31. STAMM, A. J. 1956: Thermal degradation of wood and cellulose. *Ind. Eng. Chem.* 38:630-634.
32. SUEMATSU, A.; HIRAI, N.; SAITO, F. 1980: Properties of hot pressed wood. Part I. *Mokuzai Gakkaishi* 26: 581-586.
33. TARVAINEN, V. 1995: High temperature drying: An alternative to conventional kiln drying. *Holzforschung und Holzverwertung* 47: 88-89.
34. TEISCHINGER, A. 1991: Der Einfluss des Trocknungsverfahrens auf ausgewählte Holzkennwerte. Teil 1: Literaturübersicht. *Holzforschung und Holzverwertung* 43 (1): 20-22.
35. TOPF, P. 1971A: Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°C. 1. Mitt.: Stand der Forschung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 28(7):269-275.
36. TOPF, P. 1971B: Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°C. 2. Mitt.: Versuche zur Frage der Selbstentzündung, des Gewichtsverlustes, des Brennwertes und der Elementaranalysen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 29(8):295-300.
37. WEICHERT, L. 1963: Untersuchungen über das Sorptions- und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen-Pressvollholz bei Temperaturen zwischen 20°C und 100°C. *Holz als Roh- und Werkstoff* 21 (8): 290-300.
38. WISE, L. E.; JAHN, E. C. 1952: Wood chemistry, New York.