

R. Popper · P. Niemz · G. Eberle

## Untersuchungen zum Sorptions- und Quellungsverhalten von thermisch behandeltem Holz

Published online: 19 February 2005

© Springer-Verlag 2005

**Zusammenfassung** Proben aus *Pinus radiata* D. Don), *Pseudotsuga menziesii* Franco), *Laurelia sempervirens* (R. et Pav.) Tul., Edelkastanie (*Castanea sativa* Mill.) und Eiche (*Quercus robur* L.) wurden im belüfteten Trockenschrank jeweils 24 h bei 100°C, 150°C bzw. 200°C wärmebehandelt. Danach wurden das Sorptionsverhalten bei variabler Luftfeuchte und die Quellung in radialer und tangentialer Richtung bestimmt. Als Bezugsbasis dienten unbehandelte Proben. Je Variante wurden zehn Proben verwendet. Das Sorptionsverhalten wurde basierend auf den gemessenen Werten mit dem Hailwood–Horrobin-Modell berechnet. Je nach Holzart kam es bereits ab 100°C teilweise zu einer merklichen Reduzierung der Gleichgewichtsfeuchte. Bei 150°C und insbesondere bei 200°C war eine deutliche Reduzierung der Gleichgewichtsfeuchte und Quellung vorhanden. Mit dem HH-Modell konnte nachgewiesen werden, dass es dabei sowohl zu Änderungen der Porenstruktur als auch der Chemisorption kommt. Auch die Verkettung der Cellulosemoleküle ändert sich. Der Unterschied zwischen tangentialer und radialer Quellung steigt in der Reihenfolge *Pinus radiata*, *P. menziesii*, *C. sativa*, *L. sempervirens* und *Q. robur*. Die tangentielle Quellung ist allgemein empfindlicher auf die Wärmebehandlung als die radiale. Was die tangentielle Quellung anbelangt setzt sich *Q. robur* von den übrigen untersuchten Holzarten in den absoluten Werten deutlich ab. Mit Ausnahme von *Pinus radiata* tendiert der Anisotropie-Koeffizient bei 200°C dazu, leicht abzunehmen. Die Dichte sank bei allen Holzarten durch die Behandlung ab.

### Investigations on the sorption and swelling properties of thermally treated wood

**Abstract** Samples from *Pinus radiata* D. Don, *Pseudotsuga menziesii* Franco, *Laurelia sempervirens* (R. et Pav) Tul., *Castanea sativa* Mill. and *Quercus robur* L. were heat treated under air condition in each case during 24 h at 100°C, 150°C and 200°C. The sorption behaviour and swelling (tangential and radial) were examined in the hygroscopic range between RH 11% and 93% with untreated specimens as reference basis. For each variant ten samples were used. The sorption analysis was performed using the Hailwood–Horrobin sorption model. Depending on wood species, already starting with 100°C, a noticeable reduction of the equilibrium moisture content was observed. At 150°C and particularly at 200°C a distinct reduction of the equilibrium moisture content was measured. The sorption analysis according to the Hailwood–Horrobin model showed that changes in the void structure and chemisorption occurred. Also cross linking between cellulose molecules takes place. The difference between tangential and radial differential swelling increases in the order *Pinus radiata*, *P. menziesii*, *C. sativa*, *L. sempervirens* and *Q. robur*. The tangential differential swelling is generally more sensitive to thermal treatment than the radial swelling. The absolute swelling values of *Q. robur* are significantly higher than the values of the other wood species under study. With the exception of *Pinus radiata* the anisotropy coefficient tends to decrease slightly at 200°C. In all the examined wood species the heat treatment caused a decrease in density.

R. Popper · P. Niemz (✉) · G. Eberle  
ETH Hönggerberg, HIF E 25.2, Institut für Baustoffe,  
Holzphysik, 8093 Zurich, Switzerland  
E-mail: niemz@ifb.baug.ethz.ch

### 1 Einleitung

Der Einfluss von Wärme auf die Holzeigenschaften ist je nach Höhe der Temperatur, der Umgebungsbedingun-

gen, der Einwirkungsdauer, der Heizrate und der Anfangsfeuchtigkeit des Holzes vielfältig (Rapp und Seiler 2001; Rapp et al. 2002; Militz and Tjeerdsma 2001; Tjeerdsma et al. 1998; Pazelt et al. 2002; Bächle 2003).

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 (Nagrodski in Enger 1937; Wise und Jahn 1952; Orman 1955; Schneider 1973; Kininmonth 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. Eine 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, b). Den Einfluss von Temperatur und Behandlungsdauer auf den Massenverlust findet man bei Pazelt et al. (2002).

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 und Methode

### 2.1 Versuchsmaterial

Die Versuche wurden an fünf Holzarten durchgeführt:

- 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.).

Die Probenabmessungen betragen: tangential×radial×axial = 40×40×5 mm. Die Proben wurden zunächst im Normalklima (20°C/65% rel. Luftfeuchte klimatisiert und danach einer jeweils 24 h Wärmebehandlung im belüfteten Trockenschrank bei 100°C, 150°C bzw. 200°C) unterworfen. Als Bezugsbasis dienen unbehandelte Proben. Je Variante wurden 10 Proben verwendet.

## 2.2 Versuchsmethodik

### 2.2.1 Klimatisierung

Alle Proben wurden nacheinander sieben verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt. Als Bezugszustand dienten die Abmessungen im Darrzustand. 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.

Die Klimatisierung erfolgte in abgeschlossenen Behältern mit unterschiedlichen Salzlösungen (Tabelle 1). Die Proben wurden bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte in diesen gelagert. Die Behälter befanden sich in einem klimatisierten Raum. Die Temperatur betrug 22°C. Die Luftzirkulation in den Behältern erfolgte mit einem Ventilator. Damit er nicht unnötig Wärme an den Behälter abgab, wurde er mit Hilfe eines Zeitschalters im Intervall von 15 Minuten ein- und ausgeschaltet. Das Klima im Messraum wurde mittels eines Klimasensors kontrolliert. 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 gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse zweier im Abstand von 24 Stunden aufeinander folgender Messungen um nicht mehr als 0.1% der Prüfkörpermasse voneinander abweichen. Als Bezugsmasse für die Bestimmung der Materialfeuchte wurde die Darrmasse benutzt. Gemessen wurde ferner die Rohdichte nach DIN 52182 (1976).

**Tabelle 1** Die verwendeten Klimata und ihre Erzeugung  
**Table 1** The applied climates and their production

| Klimaerzeugung                                 | Rel. Luftfeuchtigkeit (%) | Temperatur (°C) |
|--|---------------------------|-----------------|
| Darrtrocknung                                  | 0                         | 105             |
| LiCl   | 11 ± 1                    | 22 ± 1          |
| Klimakammer                                    | 20 ± 1                    | 22 ± 1          |
| Klimakammer                                    | 30 ± 1                    | 22 ± 1          |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                 | 44 ± 1                    | 22 ± 1          |
| Klimaraum/Normalklima                          | 64 ± 1                    | 22 ± 1          |
| NaCl   | 74 ± 1                    | 22 ± 1          |
| NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> | 93 ± 1                    | 22 ± 1          |

### 2.2.2 Lineares Quellmaß

Das Quellmaß  $\alpha$  ergibt sich bei Quellung vom darretrockneten 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  $\alpha_{TG_u}$  und dem radialen  $\alpha_{RD_u}$  Quellmaß.

$$\alpha_{TG_u} = 100 \cdot \frac{(a_{TG_u} - a_{TG_0})}{a_{TG_0}}, \text{ in } \% \quad (\text{Gl. (1)})$$

$$\alpha_{RD_u} = 100 \cdot \frac{(a_{RD_u} - a_{RD_0})}{a_{RD_0}}, \text{ in } \% \quad (\text{Gl. (2)})$$

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.

Das transversale Quellmaß  $\alpha_{Trans}$  wird als Summe aus dem tangentialen und dem radialen Quellmaß definiert:

$$\alpha_{Trans,u} = \alpha_{TG_u} + \alpha_{RD_u}, \text{ in } \% \quad (\text{Gl. (3)})$$

### 2.2.3 Differentielle Quellung

Für Holz und Holzwerkstoffe wird häufig die differentielle Quellung  $q$  verwendet. Diese ist gemäss DIN 52 184 (1979) als das prozentuale Quellmaß der Probe je 1% Holzfeuchtigkeitsänderung wie folgt definiert:

$$q = \frac{a_F - a_T}{a_0 \cdot (u_F - u_T)} \cdot 100 \quad (\text{Gl. (4)})$$

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 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 ( $40^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  und  $103^\circ\text{C}$ ) innerhalb von 48 Stunden allmählich einzustellen ist. Die Abmessungen werden mittels digitalen Messuhren bestimmt.

### 2.2.4 Anisotropiekoeffizient

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

$$A = \frac{\alpha_{TG}}{\alpha_{RD}} \quad (\text{Gl. (5)})$$

### 2.2.5 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:

$$DS\% = \frac{(\alpha_{UNB} - \alpha_{BEH})}{\alpha_{UNB}} \cdot 100 \quad (\text{Gl. (6)})$$

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

$\alpha_{BEH}$  Volumen- resp. Transversal-Quellung des behandelten Materials in %

### 2.2.6 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 Versuchsergebnisse

#### 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 (Abb. 1). Nur gerade im Bereich der Kapillarkondensation zeigt das wärmebehandelte Holz eine geringe Herabsetzung des Sorptionsvermögens. Aus der Tabelle 2 lässt sich herauslesen, dass sich die sorptiv aktive Oberfläche, die Unzugänglichkeit der Sorptionsstellen zum Sorbat, das hypothetische Molekulargewicht des Sorbens und das molekulare 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 monomolekular- 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

**Tabelle 2** Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und wärmebehandelte Holz (*Pinus radiata*) bei Fasersättigung

**Table 2** Computed values of the sorption analysis according to the HH-model for the untreated and heat treated wood (*Pinus radiata*) during fiber saturation

| Behandlungsart | $\Sigma$ | Z  | $M_p$ | $U_{FS}$ | $U_p$ | $U_m$ |
|----------------|----------|----|-------|----------|-------|-------|
| 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   |

$U_m$ —berechneter Wassergehalt in der monomolekularen Schicht beim rel. Dampfdruck  $\varphi = 100\%$

$U_p$ —berechneter Wassergehalt in der polymolekularen Schicht beim rel. Dampfdruck  $\varphi = 100\%$ ,

$U_{TOT}$ —berechnete Gleichgewichtsfeuchtigkeit des Sorbens (total sorbiertes Wasser) in %,

$U_{FS}$ —berechneter Wassergehalt bei Fasersättigung ( $\varphi = p/p_s = 100\%$ ) in %,

$\Sigma$  sorptiv aktive Oberfläche des Sorbens in  $m^2/g$ ,

Z Sorbatunzugänglichkeit des Sorbens in %,

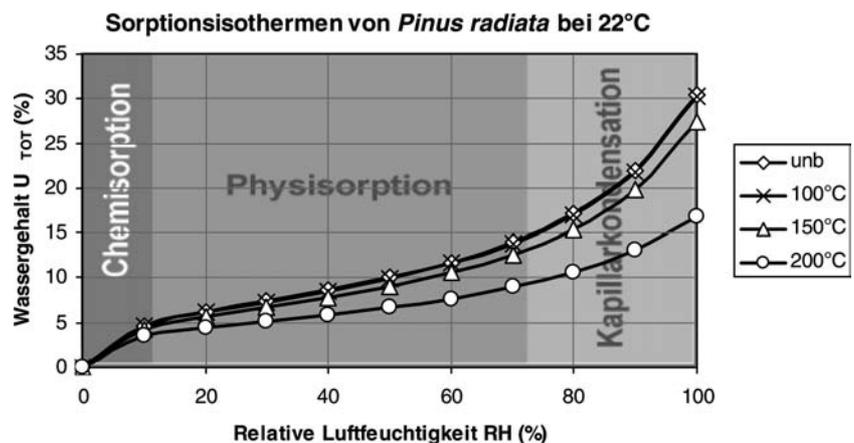
$M_p$ —hypothetisches Molekulargewicht des Sorbens

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.

##### 3.1.2 *Pseudotsuga menziesii*

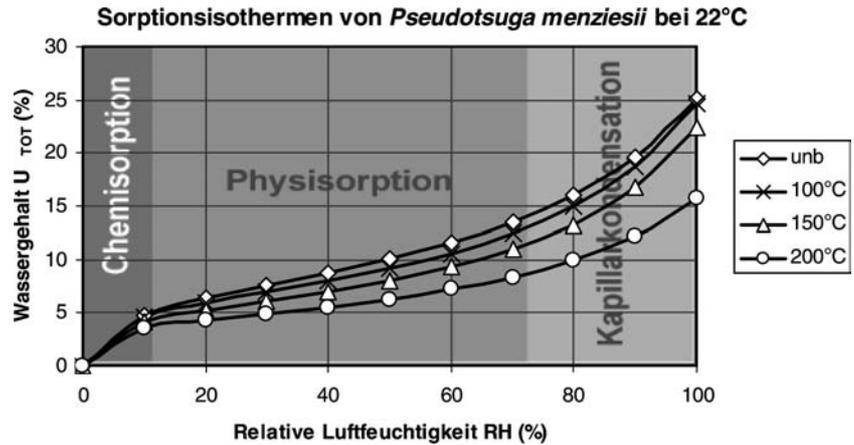
Aus dem Verlauf der Sorptionskurven von Douglasienholz (Abb. 2) kann man erkennen, dass bereits die 24 Stunden dauernde Wärmebehandlung von 100°C eine Herabsetzung des Sorptionsvermögens im gesamten

**Abb. 1** Nach HH-Sorptionsmodell berechnete Isothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Pinus radiata*) bei 22°C  
**Fig. 1** According to HH sorption model computed isotherms of untreated and heat treated wood (*Pinus radiata*) with 22°C



**Abb. 2** Nach HH-Sorptionsmodell berechnete Isothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Pseudotsuga menziesii*) bei 22°C

**Fig. 2** According to HH sorption model computed isotherms of untreated and heat treated wood (*Pseudotsuga menziesii*) with 22°C



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 polymolekulare gebundene Wasser bei 100°C weist praktisch keine Veränderung gegenüber dem unbehandelten Holz auf, so dass die Herabsetzung des Sorptionsvermögens nur auf das monomolekulare gebundene Wasser zurückzuführen ist. Bei 150°C kann man bereits eine geringe Herabsetzung des polymolekulare gebundenen Wassers feststellen, was auf eine Veränderung der Porenstruktur des Holzes hindeutet. Erst ab 200°C ist ein deutlicher Verlust an Sorptionskapazität im Bereich des monomolekulare- als auch des polymolekulare gebundenen Wassers zu verzeichnen.

Betrachtet man den Wassergehalt bei Fasersättigung (Tabelle 3) 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  $\Sigma$ -Wertes lassen die Vermutung zu, dass es zu einer gewissen Öffnung der Porenstruktur sowie zum Verlust an Kristallinität gekommen ist. Das monomolekulare-, das polymolekulare- 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.

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

**Table 3** Computed values of the sorption analysis according to the HH-model for the untreated and heat treated wood (*Pseudotsuga menziesii*) at fiber saturation

| Behandlungsart | $\Sigma$ | $Z$ | $M_p$ | $U_{FS}$ | $U_P$ | $U_m$ |
|----------------|----------|-----|-------|----------|-------|-------|
| Unbehandelt    | 230      | 53  | 261   | 25.1     | 18.6  | 6.5   |
| 100°C          | 203      | 46  | 301   | 24.7     | 18.9  | 5.7   |
| 150°C          | 177      | 53  | 346   | 22.4     | 17.4  | 5.0   |
| 200°C          | 142      | 63  | 438   | 15.7     | 11.7  | 4.0   |

### 3.1.3 *Laurelia sempervirens*

Diese Holzart reagiert besonders empfindlich auf die Wärmebehandlung. Wie aus dem Verlauf der Sorptionsisothermen hervorgeht (Abb. 3), 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 unimolekulare als auch polymolekulare Sorptionskapazität gegenüber dem unbehandelten Holz.

Die Fasersättigungswerte (Tabelle 4) deuten darauf hin, dass aufgrund der durchgeführten Wärmebehandlungen eine kontinuierliche Verminderung der sorptiv aktiven Oberfläche  $\Sigma$ , 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 polymolekulare 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.

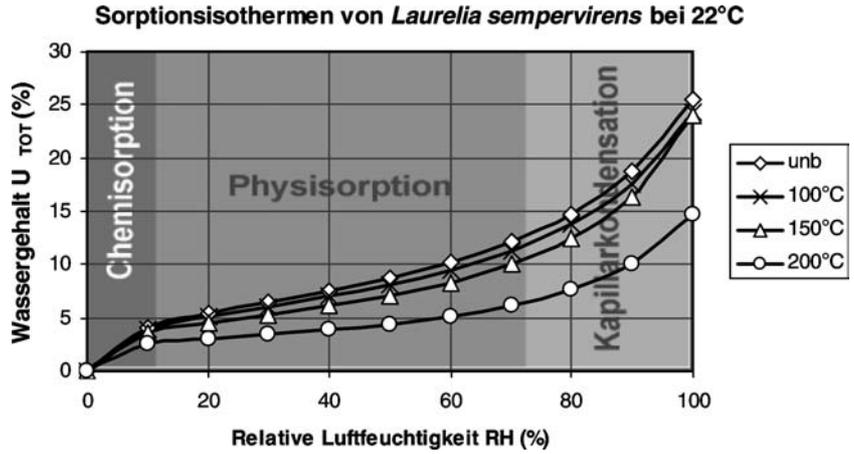
### 3.1.4 *Castanea sativa*

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 (Abb. 4).

Die nach dem HH-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 Sorbenoberfläche  $\Sigma$ , der Unzugänglichkeit des Sorbens zum Sorbat ( $Z$ ) und das hypothetische Molekulargewicht des Sorbens ( $M_p$ ) sind in Tabelle 5 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  $\Sigma$  nimmt mit der steigenden Behandlungstemperatur ebenfalls ab während das

**Abb. 3** Nach HH-Sorptionsmodell berechnete Isothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Laurelia sempervirens*) bei 22°C

**Fig. 3** According to HH sorption model computed isotherms of untreated and heat treated wood (*Laurelia sempervirens*) with 22°C



**Tabelle 4** Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und wärmebehandelte Holz (*Laurelia sempervirens*) bei Fasersättigung

**Table 4** Computed values of the sorption analysis according to the HH-model for the untreated and heat treated wood (*Laurelia sempervirens*) at fiber saturation

| Behandlungsart | $\Sigma$ | Z  | $M_p$ | $U_{FS}$ | $U_p$ | $U_m$ |
|----------------|----------|----|-------|----------|-------|-------|
| 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   |

**Tabelle 5** Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und wärmebehandelte Holz (*Castanea sativa*) bei Fasersättigung

**Table 5** Computed values of the sorption analysis according to the HH-model for the untreated and heat treated wood (*Castanea sativa*) at fiber saturation

| Behandlungsart | $\Sigma$ | Z  | $M_p$ | $U_{FS}$ | $U_p$ | $U_m$ |
|----------------|----------|----|-------|----------|-------|-------|
| 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   |

hypothetische Molekulargewicht  $MP$  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.

3.1.5 *Quercus robur*

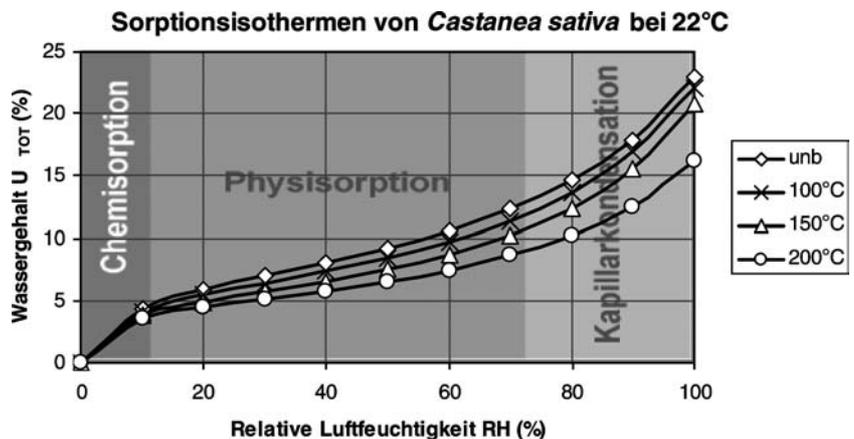
Der Verlauf der unbehandelten und wärmebehandelten Sorptionsisothermen von Eichenholz (Abb. 5) deutet darauf hin, dass die 24-stündige Behandlung bei 100°C praktisch keine Änderung gegenüber dem unbehandel-

ten Holz aufweist. Erst ab 150°C macht sich eine Herabsetzung des Wasserdampf-Sorptionsvermögens und zwar bei monomolekular- als auch bei polymolekulargebundenem Wasser bemerkbar.

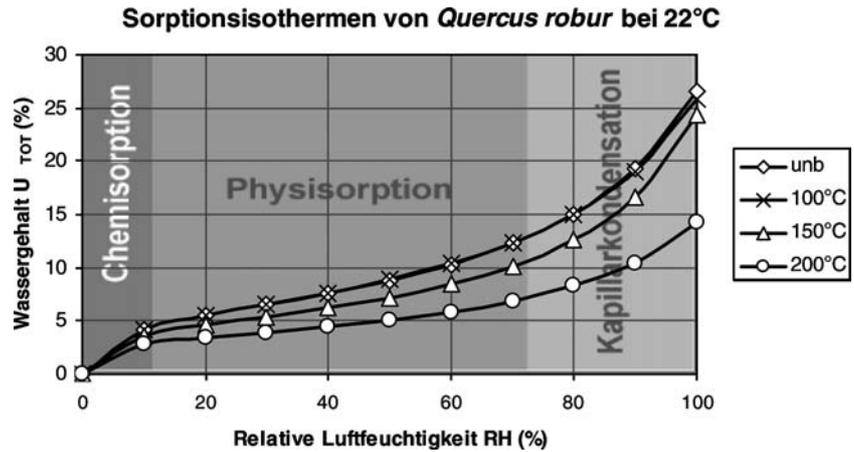
Die nach dem HH-Modell berechneten Werte bei Fasersättigungsfeuchtigkeit (Tabelle 6) zeigen eine kontinuierlich abnehmende Tendenz des  $U_p$ - und  $U_{FS}$ -Wertes zwischen unbehandeltem bis zu bei 200°C behandeltem Holz. Der  $U_m$ -Wert bei 100°C veränderte sich gegenüber demjenigen des unbehandelten Holzes nicht. Dem entsprechend haben sich auch die  $\Sigma$ -,  $Z$ - und  $M_p$ -Werte bei 100°C kaum verändert. Ab 150°C sinkt

**Abb. 4** Nach HH-Sorptionsmodell berechnete Isothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Castanea sativa*) bei 22°C

**Fig. 4** According to HH sorption model computed isotherms of untreated and heat treated wood (*Castanea sativa*) with 22°C



**Abb. 5** Nach HH-Sorptionsmodell berechnete Isothermen von unbehandeltem und wärmebehandeltem Holz (*Quercus robur*) bei 22°C  
**Fig. 5** According to HH sorption model computed isotherms of untreated and heat treated wood (*Quercus robur*) with 22°C



**Tabelle 6** Berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem HH-Modell für das unbehandelte und wärmebehandelte Holz (*Quercus robur*) bei Fasersättigung

**Table 6** Computed values of the sorption analysis according to the HH-model for the untreated and heat treated wood (*Quercus robur*) at fiber saturation

| Behandlungsart | $\Sigma$ | Z  | $M_p$ | $U_{FS}$ | $U_p$ | $U_m$ |
|----------------|----------|----|-------|----------|-------|-------|
| 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   |

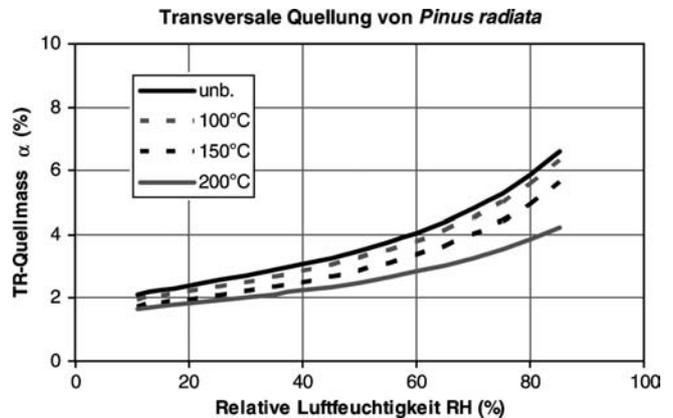
vor allem der  $U_p$ - und der  $\Sigma$ -Wert und simultan steigt auch der Z- und der  $M_p$ -Wert. Der  $U_p$ -Wert bei 150°C nimmt nur moderat ab. Daraus lässt sich folgen, dass es ab 150°C zu einer Chemisorptionsänderung mit begleitender Verkettung der Cellulose und Änderung der Porenstruktur des Sorbens gekommen ist.

### 3.2 Transversale lineare Quellung entlang der Sorptionsisotherme

In den Abbildungen 6, 7, 8, 9 und 10 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 gemessenen hygroskopischen Bereich. Beim Extrapolieren bis zum Nullpunkt würden alle Holzarten einen sigmoidalen Kurvenverlauf der Funktion  $\alpha = f(RH)$  zeigen.

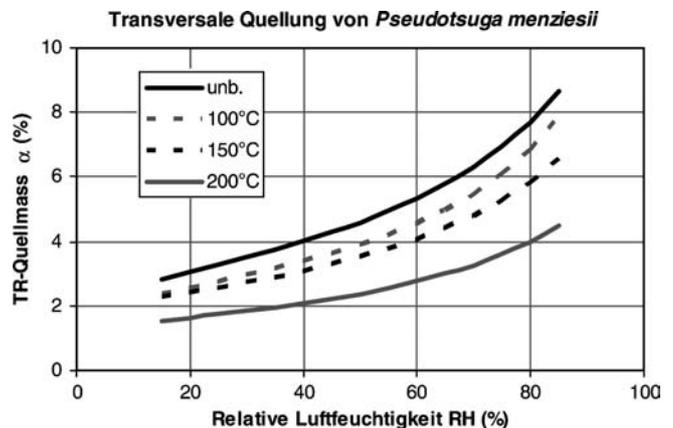
#### 3.2.1 *Pinus radiata*

Aus dem Verlauf der Quellung entlang des hygroskopischen Bereichs 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 (Abb. 6). Die Wärmebehandlung bei 200°C bewirkt eine deutliche Quellungsverminderung gegenü-



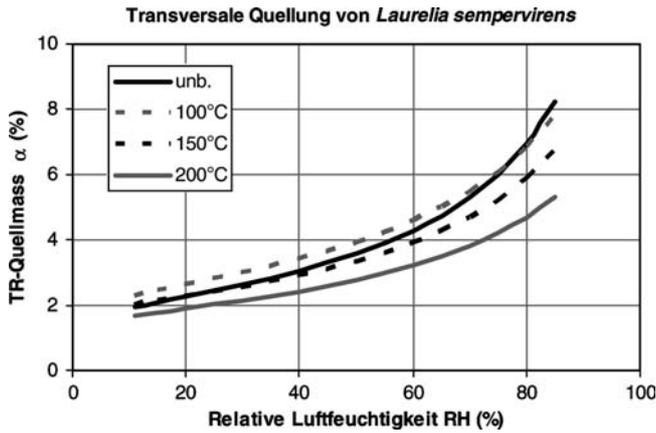
**Abb. 6** Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Pinus radiata*) im hygroskopischen Bereich

**Fig. 6** The transversal swelling of the untreated and heat treated wood (*Pinus radiata*) within the hygrosopic range



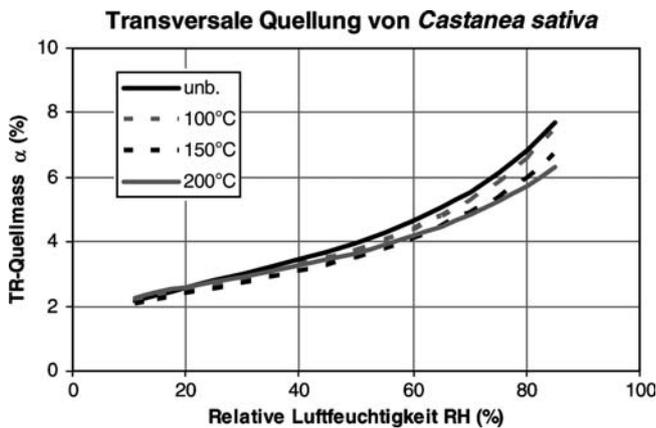
**Abb. 7** Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Pseudotsuga menziesii*) im hygroskopischen Bereich

**Fig. 7** The transversal swelling of the untreated and heat treated wood (*Pseudotsuga menziesii*) within the hygrosopic range



**Abb. 8** Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Laurelia sempervirens*) im hygroskopischen Bereich

**Fig. 8** The transversal swelling of the untreated and heat treated wood (*Laurelia sempervirens*) within the hygroscopic range



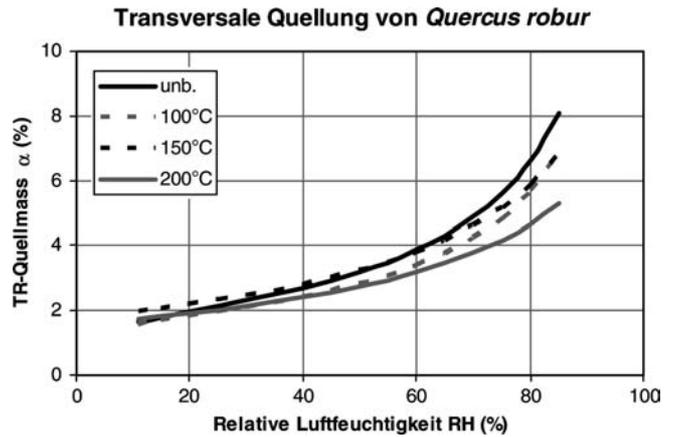
**Abb. 9** Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Castanea sativa*) im hygroskopischen Bereich

**Fig. 9** The transversal swelling of the untreated and heat treated wood (*Castanea sativa*) within the hygroscopic range

ber 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.

### 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 (Abb.



**Abb. 10** Verlauf der transversalen Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Quercus robur*) im hygroskopischen Bereich

**Fig. 10** The transversal swelling of the untreated and heat treated wood (*Quercus robur*) within the hygroscopic range

7). 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 Proben führten.

### 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) (Abb. 8).

### 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 (Abb. 5).

### 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 Feuchteverformungs-

verminderung gegenüber dem unbehandelten Holz (Abb. 10).

### 3.3 Differentielle Quellung

Die differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes ist in Tabelle 7 und graphisch in Abb. 11, 12, 13, 14 und 15 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.

### 3.4 Anisotropiekoeffizient

Aus Tabelle 8 ist zu entnehmen, dass der Anisotropiekoeffizient  $A$  von Radiata- 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 Radi-

ataholz tendiert der  $A$ -Wert bei 200°C leicht abzunehmen.

### 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 diente dann zur Berechnung der in Tabelle 9 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 9, Abb. 16).

### 3.6 Normal-Rohdichte

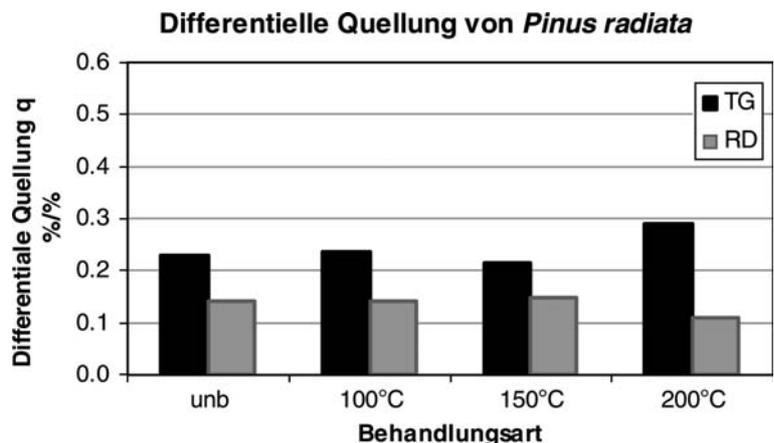
Wie aus Tabelle 10 und Abb. 17 hervorgeht führt die Wärmebehandlung bei allen untersuchten Holzarten

**Tabelle 7** Differentielle Quellung in  $q\%/%$  des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes  
**Table 7** Differential swelling  $q\%/%$  of the untreated and heat treated wood

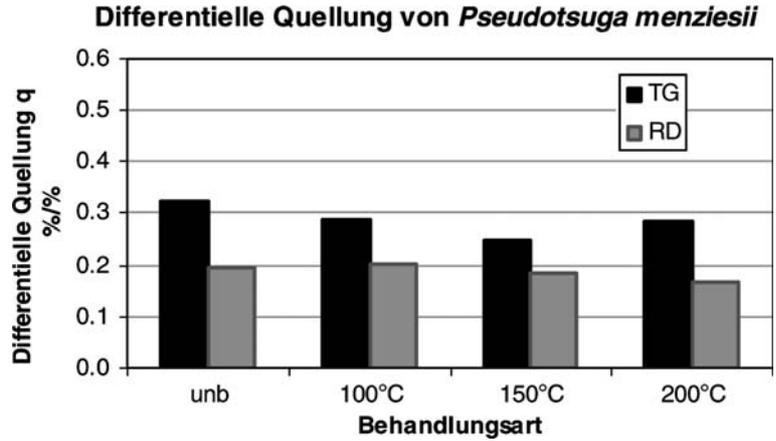
| Holzart                      | Behandlungsart |       |       |       |        |       |       |       |
|------------------------------|----------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
|                              | Tangential     |       |       |       | Radial |       |       |       |
|                              | 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  |

**Abb. 11** Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Pinus radiata*)

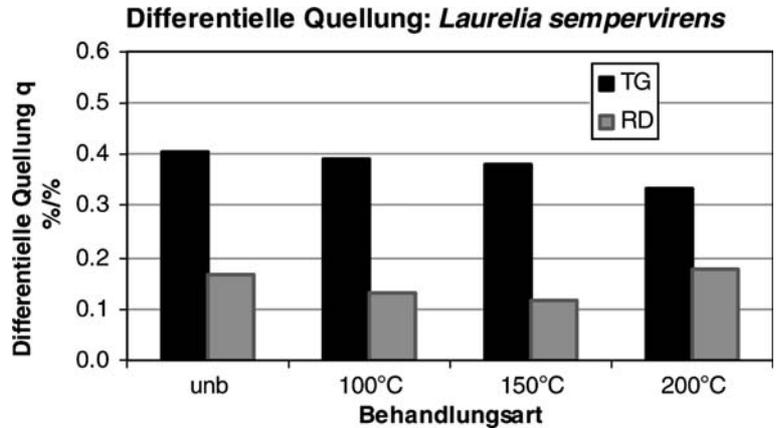
**Fig. 11** Differential swelling of the untreated and heat treated wood (*Pinus radiata*)



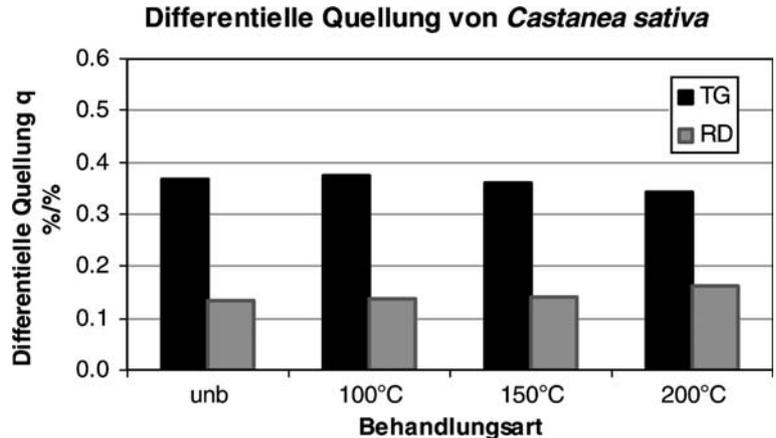
**Abb. 12** Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Pseudotsuga menziesii*)  
**Fig. 12** Differential swelling of the untreated and heat treated wood (*Pseudotsuga menziesii*)



**Abb. 13** Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Laurelia sempervirens*)  
**Fig. 13** Differential swelling of the untreated and heat treated wood (*Laurelia sempervirens*)



**Abb. 14** Differentielle Quellung des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes (*Castanea sativa*)  
**Fig. 14** Differential swelling of the untreated and heat treated wood (*Castanea sativa*)



tendenziell zur Verminderung der Normal-Rohdichte. Dies deutet darauf hin, dass durch steigende Temperaturbehandlung allmählich Abbaureaktionen im Holz stattfinden.

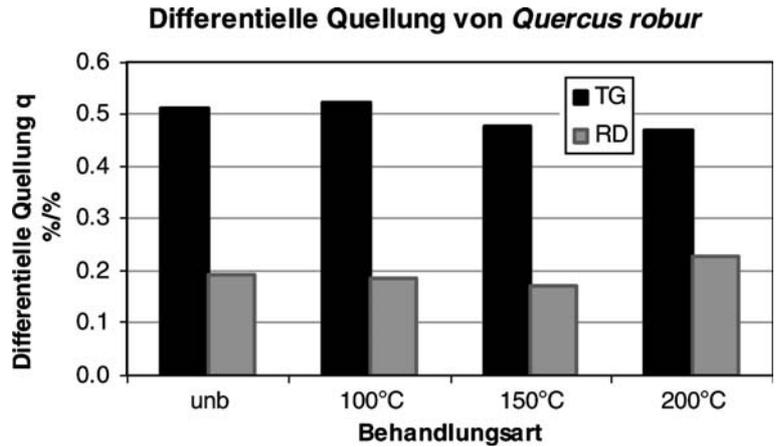
#### 4 Schlussfolgerungen

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

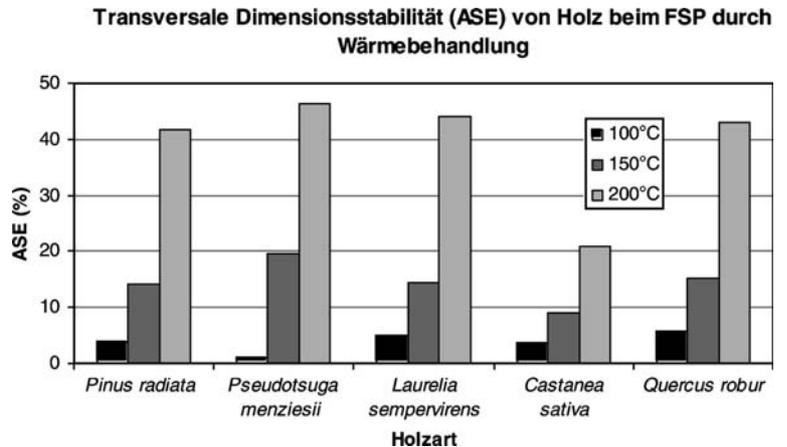
**Abb. 15** Differential swelling of the untreated and heat treated wood (*Quercus robur*)

**Fig. 15** Differential swelling of the untreated and heat treated wood (*Quercus robur*)



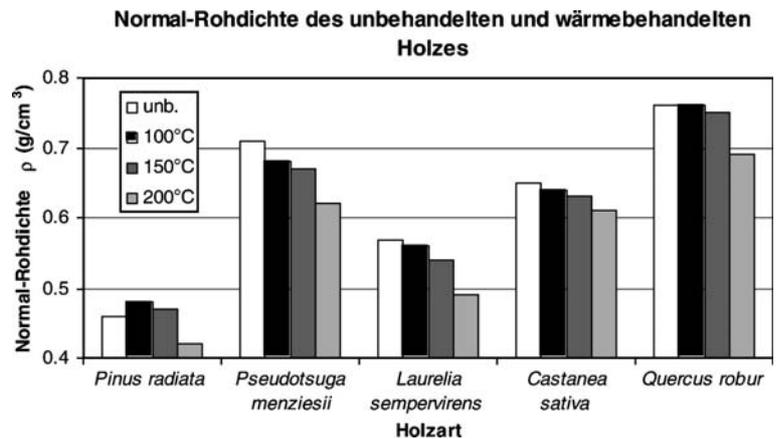
**Abb. 16** Transversale Dimensionsstabilität von Holz bei Fasersättigungsfeuchtigkeit aufgrund 24-stündiger Wärmebehandlung

**Fig. 16** Transversal dimensional stability of wood with fiber saturation humidity due to 24 h thermal treatment



**Abb. 17** Einfluss der Behandlungsart auf die Normal-Rohdichte

**Fig. 17** Influence of the type of treatment on the normal bulk density



Durchlässigkeitsänderungen des Holzes führen. Die hier durchgeführten Untersuchungen an wärmebehandeltem Holz erlauben folgende Schlüsse zu ziehen:

#### 4.1 Wasserdampfsorption

##### 4.1.1 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 polymolekulare gebundenen Wassers zurückzuführen.

*Pseudotsuga menziesii* weist bereits innerhalb des ganzen, untersuchten hygroskopischen Bereich eine Herabsetzung des Sorptionsvermögens auf. Diese Verminderung der Sorptionskapazität ist jedoch lediglich auf das monomolekular gebundene Wasser zurückzuführen.

**Tabelle 8** Anisotropiekoeffizienten des unbehandelten und wärmebehandelten Holzes bei Fasersättigungsfeuchtigkeit**Table 8** Anisotropy coefficients of the untreated and heat treated wood at fiber saturation humidity

| 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   |

**Tabelle 9** Transversale Dimensionsstabilität (ASE) des Holzes bei Fasersättigungsfeuchtigkeit aufgrund 24-stündiger Wärmebehandlung in %**Table 9** Transversal dimensional stability (ASE) of the wood with fiber saturation humidity due to 24 h thermal treatment in %

| 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 |

PI *Pinus radiata*, PS *Pseudotsuga menziesii*, LA *Laurelia sempervirens*, CA *Castanea sativa*, QU *Quercus robur***Tabelle 10** Normal-Rohdichte des Versuchsmaterials in g/cm<sup>3</sup>**Table 10** Normal bulk specific gravity of the examined material in g/cm<sup>3</sup>

| 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  |

*Laurelia sempervirens* reagiert allgemein besonders empfindlich auf die Wärmebehandlung. Es ist 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.

#### 4.1.2 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 polymolekular gebundenem Wasser bemerkbar. Aus der Sorptionsanalyse lässt sich folgern, dass es ab 150°C zu einer Chemisorptionsänderung mit begleitender Verkettung der Cellulose und Änderung der Porenstruktur des Sorbens gekommen ist.

#### 4.2 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 (Abb. 6). 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.

Die angewendeten Wärmebehandlungen an *Pseudotsuga menziesii* bewirken im ganzen untersuchten Luftfeuchtebereich eine Herabsetzung des transversalen Quellmaßes gegenüber dem unbehandelten Holz (Abb. 7). 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 Versuchsproben Radialrisse aufwiesen, die teilweise bis zum Zerbrechen der Proben führten.

Der Feuchteverformungsverlauf von *Laurelia sempervirens* (Abb. 8) zeigt in Bezug auf die Behandlungs-

temperatur 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* (Abb. 9) 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* (Abb. 10) 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.

#### 4.3 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.

#### 4.4 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.

#### 4.5 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%.

#### 4.6 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.

#### References

- Bächle F (2003) Weathering resistance of oil-heat-treated timber. COST-Aktion E 22:46
- 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
- Bariska M, Skaar C, Davidson RW (1969) Studies of the wood-anhydrous ammonia system. Wood Sci 2(2):65
- DIN 50 014. Jul (1985) Klimate und ihre technische Anwendung. Normalklimate. Seiten 1–21
- DIN 52 182. Sep. (1976) Prüfung von Holz. Bestimmung der Rohdichte. Seite 1–2
- DIN 52 183. Nov. (1977) Prüfung von Holz. Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. Seite 1–2.
- DIN 52 184. Mai (1979) Prüfung von Holz. Bestimmung der Quellung und Schwindung. Seite 1–4
- Enger K (1937) Neuere Erkenntnisse über die Vergütung der Holzeigenschaften. Mitt Fachaussch Holzfragen 18:2–3
- Furuta Y, Aizawa H, Yano H, Norimoto M (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 Jpn Wood Res Soc (Mokuzai Gakkaishi) 43(9):725–730
- Gerhards CC (1982) Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood; an analysis of immediate effects. Wood Fiber 14(1):4–36
- Glos P, Henrici D (1991) Längsdruck-E-Modul von Fichtenbauholz im Temperaturbereich bis 150°C. Holz Roh- Werkstoff 49:298
- 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 Roh- Werkstoff 58:63–71
- Hillis WH (1984) High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1: general consideration. Wood Sci Technol 18:281–293
- Hillis WH, Rozsa AN (1985a) High temperature and chemical effects on wood stability. Part 2. The effect of heat on the softening of radiata pine. Wood Sci Technol 19:57–66
- Hillis WH, Rozsa AN (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 19:93–102
- Hunter AJ, Sutherland JW (1997) The evaporation of water from wood at high temperatures. Wood Sci Technol 31:73–76
- Kamdern DP, Pizzi A, Jermannaud A (2002) Durability of heat-treated wood. Holz Roh- Werkstoff 60:1–6
- Keylwerth R (1966) Temperatur- und Feuchtigkeitsgefälle in Holzbauteilen. Holz Roh- Werkstoff 25:452–454
- Kininmonth JA (1976) Bonding in press-dried sheets from high-yield pulps. The role of lignin and hemicelluloses. Tappi 62(7):77–80
- Militz H, Tjeerdsma B (2001) Treatment of wood by the "PLATO-PROCESS". Proceedings of the special seminar held in Antibes, France, on 9. February 2001 27–37
- Nakano T, Furuta Y, Yano H (1997) Interpretation of the temperature dependence of relative change in elastic modulus of wood. J Jpn Wood Res Soc (Mokuzai Gakkaishi) 43(7):532–536

- Niemz P, Matejak M (1997) Untersuchungen zum Einfluss der thermischen Vorbehandlung auf die Gleichgewichtsfeuchtigkeit von *Radiata pine*. *Ann Warsaw Agric Univ* 48:107–109
- Orman HR (1955) The response of New Zealand timbers to fluctuations in atmospheric moisture conditions. *Tech. Pap. Forest Res. Inst. N.Z. Forest Ser. No. 8*
- Pazelt M, Stingl R, Teilschinger A (2002) Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte Holzeigenschaften. In *Lignovisionen, Schriftenreihe des Institutes für Holzforschung und des Verbands Holzwirte Österreichs, Band 3*:101–147
- Pecina H (1978) Zur Aussagefähigkeit von IR- Spektrogrammen über chemische Strukturveränderungen des Holzes mit dem Beispiel thermischer Behandlung. *Holztechnologie* 23:78–84
- Pecina H, Paprzycki O (1988) Wechselbeziehung zwischen der Temperaturbehandlung des Holzes und seiner Benetzbarkeit. *Holzforschung Holzverwertung* 40(1):5–8
- Popper R (1991) Einfluss der Wärme auf physikalische, physikalisch chemische und chemische Eigenschaften lignocellulose-scher Materialien. D-WAHO/Holztechnologie, Int. Ber. S.1–24
- Popper R (1991) Datenerfassungsprogramm LOGGMA. Int. Bericht D-WAHO/ETHZ
- 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
- Popper R, Eberle G (1993) Untersuchungen thermomechanischer Eigenschaften des getrockneten Holzes. *Drevarsky vyskum* 2:11–17
- Rapp AO, Sailer M (2001) Oil heat treatment of wood in Germany—state of the art. In: *Proceedings of the special seminar held in Antibes, France, on 9. February 2001* 47–64
- Rapp AO, Seiler M, Vestin M (2002) Innovative Holzvergiftung—neue Einsatzbereiche für Holz. In: *Proceedings of the Dreiländer-Holztagung in Lucerne, Switzerland*
- Sailer M, Rapp AO, Leithoff H, Peek R-D (2000) Vergütung von Holz durch Anwendung einer Öl-Hitzebehandlung. *Holz Roh-Werkstoff* 58:15–22
- Schneider A (1973) Investigation on the conversion drying of lumber at extremely high temperatures. Part II. *Holz Roh-Werkstoff* 31:198–206
- Schuerch C (1964) Wood plasticization. *Forest Prod J* 16(9):377
- Stamm AJ (1956) Thermal degradation of wood and cellulose. *Ind Eng Chem* 38:630–634
- Suematsu A, Hirai N, Saito F (1980) Properties of hot pressed wood. Part I. *Mokuzai Gakkaishi* 26:581–586
- Tarvainen V (1995) High temperature drying: an alternative to conventional kiln drying. *Holzforschung Holzverwertung* 47:88–89
- Teilschinger A (1991) Der Einfluss des Trocknungsverfahrens auf ausgewählte Holzkennwerte. Teil 1: Literaturübersicht. *Holzforschung Holzverwertung* 43(1):20–22
- Tjeerdsma BF, Boonstra M, Pizzi A, Tekely P, Militz H (1998) Characterisation of thermal modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz Roh- Werkstoff* 56:149–153
- Topf P (1971a) Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 180°C. 1. Mitt.: Stand der Forschung. *Holz Roh-Werkstoff* 28:269–275
- 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 Roh- Werkstoff* 29:295–300
- Weichert L (1963) Untersuchungen über das Sorptions- und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen-Pressvollholz bei Temperaturen zwischen 20°C und 100°C. *Holz Roh-Werkstoff* 21(8):290–300
- Wise LE, Jahn EC (1952) *Wood chemistry*, New York