

Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Baustoffe
Holzphysik
CH-8093 Zürich

Int. Bericht ETHZ/IfB-HP Nr. 36

**Industrielle Untersuchungen zur Optimierung der
Eigenschaften von thermisch vergütetem Holz, insbesondere
Laubholz**

Wald&Holz Projekt Nr. 2005.07

FRITZ BÄCHLE (ETH); ANDREAS SCHMUTZ (BALZ HOLZ AG)

Bearbeitungszeitraum: März – Dezember 2006

Zürich, den 20.12.2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Literaturauswertung	4
2.1.	Thermische Behandlung	4
2.2.	Dämpfen	7
3.	Material und Methoden	8
3.1.	Biegeproben	8
3.2.	Proben für Bestimmung der pH-Werte und Extraktstoffe	9
3.3.	Proben für Wärmeleitfähigkeit	9
3.4.	Proben für Farbmessungen bezüglich Verkernung	9
3.5.	Methoden	9
4.	Resultate	11
4.1.	Rohdichte	11
4.2.	Ultraschall / Eigenfrequenz	12
4.3.	Statische Biegeprüfung	14
4.4.	Vergleich der nach unterschiedlichen Methoden ermittelten E-Moduln	19
4.5.	Brinell-Härte	22
4.6.	Quellung / Sorption	26
4.7.	Wasserlagerung	28
4.8.	pH-Wert	32
4.9.	Extraktstoffe	33
4.10.	Farbe / Helligkeit	34
4.11.	Einfluss der Wärmebehandlung auf die Farbdifferenz bei rotkerniger Buche und braunkerniger Esche	36
4.12.	Wärmeleitfähigkeit	38
5.	Diskussion	39
5.1.	Festigkeiten	39
5.2.	Härte	39
5.3.	Quellung / Sorption	39
5.4.	Wasserlagerung	40
5.5.	pH-Wert	40
5.6.	Farbe	40
5.7.	Wärmeleitfähigkeit	40
6.	Fazit	41
	Literatur	44

Anhang A1 – Datentabelle	45
Anhang A2 – Datenblatt allgemein	46
Anhang A3 – spezifische Datenblätter	47

1 Einleitung

Die thermische Behandlung von Holz bewirkt neben einer gesteigerten Pilzresistenz auch eine verbesserte Dimensionsstabilität und eine einheitliche Farbgebung. Damit unterscheidet sich die thermische Behandlung deutlich vom Dämpfen, welches lediglich bei der Holzfarbe eine wesentliche Änderung hervorruft, die Eigenschaften wie Pilzresistenz oder Dimensionsstabilität (bei hohen rel. Luftfeuchten) aber nicht beeinflusst.

Mit der thermischen Behandlung geht aber auch ein Festigkeitsverlust einher, welcher dann den Einsatz von statisch belasteten Elementen erschwert. Im Rahmen des Projektes sollen in Zusammenarbeit zwischen der ETH Zürich und der Balz Holz AG Langnau i.E. die Eigenschaften von industriell behandeltem Holz (Laub- und Nadelholz) der Fa. Balz Holz AG mit jeweils unterschiedlicher Behandlungsintensität geprüft werden, um zuverlässige Kennwerte für die Produkte zu erhalten. Zudem wird der Einfluss von Rotkern der Buche bzw. Braunkern der Esche auf die Farbegalierung, aufbauend auf Laborarbeiten von Oelhafen, nach industrieller Behandlung im Autoklav untersucht. Ergänzend wird dieser Effekt bei Douglasie geprüft. Dabei wird auf eine Farbgleichheit Splint-Kern abgezielt. Die Versuche werden zunächst auf mechanisch-physikalische Eigenschaften (E-Modul, Festigkeit, Sorptionsverhalten) und den pH-Wert sowie die chemische Zusammensetzung begrenzt.

2 Literaturauswertung

Das Kapitel ist in die Teile „Thermische Behandlung“ und „Dämpfen“ unterteilt. Dies in Hinblick auf die deutlichen Unterschiede dieser beiden Behandlungen bezüglich Verfahren und Auswirkungen auf das Holz. Praktisch werden heute vielfach noch Produkte beider Behandlungsarten als Thermoholz gehandelt. Die thermische Behandlung darf aber nicht mit dem Dämpfen (Behandlung in Wasserdampfatmosphäre) gleichgesetzt werden. Dämpfen und Räuchern erzielen zwar auch Farbänderungen, aber keine Änderung des Sorptions- und Quellungsverhaltens, ebenso nicht der mechanischen Eigenschaften.

2.1. Thermische Behandlung

Unter dem Begriff Holzmodifikation versteht man die Veränderung des Holzes sowohl als Massnahme zum Schutz des Holzes durch Erhöhung der Dauerhaftigkeit als auch zur Verbesserung von Dimensionsstabilität. Das Holz wird allgemein bei diesen Verfahren mehrere Stunden bei Temperaturen zwischen 170-220°C erhitzt. Auch andere Verfahren der Modifikation sind bekannt. Dazu gehören z.B. das Füllen der Zelllumen oder der Zellwand, chemische Bindungen der freien OH-Gruppen oder Modifikation der Zellwandstruktur (vgl. z.B. Militz und Hill 2005).

Von diesen Modifizierungsverfahren ist in Europa die thermische Behandlung industriell am weitesten entwickelt. Die Hitzebehandlung benötigt keine zusätzlichen chemischen Stoffe und kann mit relativ einfachen technischen Mitteln durchgeführt werden. Es werden keine Zusatzstoffe in das Holz eingebracht, was aus ökologischer Sicht bedeutend ist. Verschiedene Verfahren sind in Europa im Einsatz (Militz 2002; Rapp 2001).

Bei der thermischen Vergütung wird durch Wärmezufuhr die Holzstruktur auf chemischer Ebene verändert, was je nach Behandlungsparametern sehr verschieden stark ausgeprägte Änderungen der physikalischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften des Holzes bewirkt (Burmester 1970, Kollmann und Schneider 1964). Bei der thermischen Modifikation werden die freien OH-Gruppen um- und abgebaut, wodurch das Wasser reduzierte Bindungsmöglichkeiten hat.

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Untersuchungen durchgeführt, die eine Behandlung von Holz im Temperaturbereich über 100°C zum Inhalt hatten. Schon 1920 wurde die verbesserte Dimensionsstabilität von Holz nach einer Hochtemperaturtrocknung festgestellt (Tiemann 1947). Stamm und Hansen (1937) publizierten erste Arbeiten zur Wärmebehandlung. In den 60- bis 80er Jahren wurden umfangreiche Forschungsarbeiten zur Thematik durchgeführt. So prüfte Stamm (1964), den Einfluss der Erwärmung des Holzes in einem Bad aus flüssigem Metall. Mit dem veränderten Sorptionsverhalten der modifizierten Hölzer beschäftigten sich Kollmann und Schneider (1964). Die erhöhte Pilzresistenz wurde in den fünfziger Jahren von Buro (1954) nachgewiesen, der die beobachtete geringere Ausgleichsfeuchte als Grund für die sinkende Wahrscheinlichkeit des Befalls erkannte. Giebler (1981) legte mit seinen Arbeiten zur Wärmebehandlung im Autoklaven in Stickstoffatmosphäre die Basis für das heute industriell von der Fa. Balz Holz AG angewandte Verfahren. Eine industrielle Umsetzung des Verfahrens erfolgte aber bei der Balz Holz AG erst ab 2002.

Bei der thermischen Behandlung kommt es je nach Intensität der Behandlung zu einem Masseverlust. Die Höhe des Masseabbaus ist von den Prozessparametern wie Behandlungsdauer, Temperatur und Druck abhängig. Einen sehr entscheidenden Einfluss hat auch die Atmosphäre, die das Holz während des Vergütungsprozesses umgibt. Die thermische Behandlung führt ab einer Temperatur von 130°C zu einem deutlichen Abbau der Holzmasse (Bächle 2004, Junghans 2003, Teischinger und Stingl 2002). Um die Anwesenheit von Sauerstoff zu unterbinden wurde auch ein Verfahren entwickelt, bei welchem die thermische Behandlung in einem Ölbad stattfindet. Dabei wirkt das pflanzliche Öl (z.B. Hanföl) einerseits als Sauerstoffabschluss und ist andererseits auch für die Wärmeübertragung zuständig (Leithoff und Peek 2001, Sailer et al. 2000a).

Die thermische Behandlung unter Anwesenheit von Sauerstoff führt zu einem höheren Masseverlust des Holzes, im Gegensatz zur Behandlung im Vakuum oder Stickstoffatmosphäre, wo geringere Masseverluste auftreten. Dies ist auf die stark oxidierende Wirkung des Sauerstoffes zurückzuführen, der die auftretenden chemischen Reaktionen verstärkt und beschleunigt (Bächle 2004, Burmester 1970, Junghans 2003, Kollmann und Schneider 1964, Teischinger 2002).

Die Aktivierungsenergie für die Zersetzungsreaktionen ist bei trockener Erhitzung nur etwa halb so gross wie unter Einwirkung von Feuchtigkeit (Kollmann und Schneider 1964, Burmester 1970). Auch ist die thermische Zersetzung in einem abgeschlossenen System bei Anwesenheit von Wasser grösser als in einem System, in dem die flüchtigen Produkte entweichen können. In einem geschlossenen System können die entstehenden Säuren zu immer höher konzentrierten Lösungen werden, die bei den hydrolytischen Vorgängen als Katalysator wirken (Kollmann und Schneider 1964).

Infolge der thermischen Zersetzung der Holzbestandteile ändern sich auch die Sorptions- und Quellungseigenschaften von Holz. Da der Abbau bzw. die Umwandlung der chemischen Struktur des Holzes die Anzahl der reaktiven OH-Gruppen verringert (es wird vor allem die Hemizellulose abgebaut), können auch weniger Wassermoleküle gebunden werden. Mit der geringeren Menge aufgenommenen Wassers bei gleicher Luftfeuchte und Temperatur weisen thermisch modifizierte Hölzer eine verbesserte Dimensions-stabilität auf.

Durch eine steigende Behandlungstemperatur und Behandlungsdauer ist eine Abnahme des Sorptionsvermögens und den damit verbundenen Schwind- und Quellwerte auf bis zu 50% zu verzeichnen. Versuche (Popper 2005) haben gezeigt, dass das verminderte Sorptionsvermögen bei allen Luftfeuchten auftritt, d.h. von 11% bis 93% rel. Luftfeuchte. Berechnungen innerhalb dieser Untersuchung anhand des Hailwood-Horrobin-Modells bestätigen diesen Effekt.

Hitzebehandeltes Holz hat eine gesteigerte Resistenz gegenüber Pilzen. Durch die thermische Behandlung wird der kristalline Anteil der Zellulose erhöht (Kamdem et al. 2000). Diese Erhöhung der kristallinen Anteile gegenüber den amorphen hat zur Folge, dass die Zellulose für Pilze weniger gut abbaubar wird. Pilze brauchen für ihr Wachstum eine Mindestfeuchtigkeit, die durch die verminderte Gleichgewichts-feuchte möglicherweise unterschritten wird. Auch werden die Zuckermoleküle umgewandelt und möglicherweise werden durch die thermische Behandlung toxische Nebenprodukte

produziert (Bächle 2004). Die (hydro)thermische Behandlung ist aber in der Arbeit von Tjerdsmaa et al. (2000) effektiver als eine (trockene) thermische Behandlung. Durch die thermische Behandlung können Holzarten der Stufe „nicht dauerhaft“ in die Stufe „mässig dauerhaft“ verbessert werden (Kamdem et al. 1999).

Durch die Wärmebehandlung werden die Dichte und die Festigkeit (Biegefestigkeit und insbesondere Bruchschlagarbeit) deutlich reduziert. Der E-Modul reduziert sich vergleichsweise wenig. Prüfungen (Kamdem et al. 2002) ergaben, dass die Hitzebehandlung einen Rückgang der Biegefestigkeit um 10 bis 50% verursachen kann. Sailer et al. (2000b) stellten bei der Öl-Hitzebehandlung eine leichte Erhöhung des Biegeelastizitätsmodul fest. Dagegen wurden in verschiedenen Untersuchungen Festigkeitsverluste und erhöhte Sprödigkeit von hitzebehandelten Proben festgestellt (Burmester 1970, Kamdem et al. 2002, Kollmann und Schneider 1964). Die Festigkeitsverluste bei dynamischer Belastung sind aufgrund der Holzveränderungen durch Temperaturen um 220° C relativ gross, so dass die Verwendung für tragende Bauteile oftmals eingeschränkt ist.

Die wichtigsten Einflussgrössen auf die Farbgebung sind die Behandlungsdauer, die Behandlungstemperatur, die Holzfeuchte und Umgebungsfeuchte im Behandlungsraum. Bei der thermischen Behandlung ist vor allem die Temperatur – Feuchtigkeit – Verfärbung (T-u-Verfärbung) Verursacher der Farbänderung. Diese Verfärbung entsteht durch Einwirkung von Wärme und Feuchtigkeit auf das Holz (Kollmann et al. 1951). Dabei sind bei einigen Hölzern vermutlich auch Gerbstoffe und Farbstoffe an den T-u-Verfärbungen beteiligt. Auch der Holzzucker hat möglicherweise einen Einfluss auf die Farbgebung (braune Farbe durch Karamelisierung). Die intensiveren Verfärbungen der Laubhölzer gegenüber den Nadelhölzern dürften neben dem höheren Pentosangehalt auch mit der stärkeren Säureentwicklung dieser Holzartengruppe zusammenhängen.

Die Dunkelfärbung von Holz ist unter Temperatureinwirkungen in den ersten fünf bis 10 Stunden am stärksten (Kollmann 1955). Je höher die Temperatur ist, desto dunkler verfärbt sich das Holz. Gering ist die Verfärbung bis 70°C, mässig zwischen 70 und 140°C und stark über 140°C. Versuche mit einem allfälligen Farbegalisierungseffekt zwischen Farbkern und Splint durch die thermische Behandlung liegen von Oelhafen (2005) vor und zeigen, dass eine Egalisierung erreicht wird. Bereits bei einer relativ schwachen thermischen Behandlung konnte so ein Rotkern (bei Buche) und ein Braunkern (bei Esche) optisch nicht mehr erkannt werden. Ein Zusammenhang zwischen der (durch eine thermische Behandlung hervorgerufenen) Farbe und der entsprechenden Festigkeit des Holzes konnten von Johansson und Morén (2005) nicht gezeigt werden.

Untersuchungen (siehe unter anderem Bächle 2004) haben gezeigt, dass thermisch behandeltes Holz gegen das Vergrauen durch die natürliche Bewitterung nicht beständig ist. Es unterliegt diesem Prozess gleich stark sowie gleich schnell wie unbehandeltes Holz.

Aber auch beim Einsatz im Rauminnen kommt es bei UV-Strahlung zu einer deutlichen Farbänderung (Oelhafen et al. 2006). Dabei wirkt sich das Oberflächenbeschichtungsmittel deutlich auf die Farbstabilität aus.

Die thermische Behandlung wird (bedingt durch die Anlagentechnik und das Know-how) nur von wenigen Holzhändlern durchgeführt.

2.2. Dämpfen

Unter Dämpfen versteht man eine länger dauernde Einwirkung von Hitze und Feuchtigkeit auf Holz. Eine thermische Zersetzung und eine Hydrolyse finden gleichzeitig statt. Gedämpft wird, damit das Holz seine Farbe verändert (z.B. zur Erzielung eines rötlichen Farbtons bei Buche oder bei vielen Holzarten zur Farbegalierung) aber auch zur Plastifizierung von Holz als Vorstufe vor dem Biegen, Messern und Rundschälen (Burmester 1970, Kollmann 1955, Kubinsky 1971, Riehl et al. 2002, Molnár et al. 2006) oder der Verarbeitung vor dem Holzschliff sowie zur Sterilisierung des Holzes (Kollmann 1955, Kubinsky 1971).

Der Substanzverlust beim Dämpfen ist im Vergleich zur thermischen Behandlung ohne Wasser grösser. Bedingt durch die thermische Zersetzung und der Hydrolyse nimmt mit steigender Temperatur und zunehmender Zeitdauer der Stoffverlust zu.

Neben dem thermischen Abbau der Holzbestandteile und den hydrolytischen Vorgängen werden beim Dämpfen auch Harze, Fette und Aschebestandteile ausgelaugt. Der pH-Wert nimmt mit zunehmender Behandlungsdauer und Temperatur ab (Kollmann 1955).

Kubinsky (1971), wie auch Gonet (1973) kommen zum Schluss, dass die Dämpfung keine Vergütung, sondern im Gegenteil eher eine Verschlechterung des Schwind- und Quellverhaltens zur Folge hat. Je stärker das Holz gedämpft wird, um so stärker wird das Lignin plastifiziert und gelöst. Dem zu Folge steigt der Anteil an Zellulose im Holz, die eine verstärkte Schwindung und Quellung bewirkt (Gonet 1973). Es findet auch eine Abnahme des Volumens bei höheren Temperaturen statt.

Mit steigendem Dampfdruck und steigender Dämpftemperatur sinkt der Elastizitätsmodul des Holzes (Kollmann 1955). Mässiges Dämpfen hat keine merkliche Beeinträchtigung der Festigkeitseigenschaften zur Folge. Erst nach extremen Dampfbedingungen, dass heisst nach vierstündigem Dämpfen bei 3 bar kommt es nach Kollmann (Kollmann 1955) zu Festigkeitsverminderungen. Bei starker Dämpfung nimmt die Zähigkeit (Bruchschlagarbeit) deutlich stärker ab als die Druckfestigkeit (Kollmann 1955). Auch Gonet (1973) berichtet, dass sich die Rohdichte, Druckfestigkeit und statische Biegefestigkeit unabhängig von der Art der Vorbehandlung gegenüber unbehandeltem Holz sich nicht wesentlich verändern. Die dynamische Biegefestigkeit des gedämpften Holzes ist um ca. 10 % grösser. Die Schlagbiegefestigkeit (Bruchschlagarbeit) ist um den gleichen Prozentsatz schlechter. Gedämpftes Holz verhält sich beim Quersägen und Nuten genau so wie ungedämpftes Holz, während beim Hobeln und Kehlen Unterschiede bestehen. Das gedämpfte Holz ist jedoch etwas spröder (Kollmann 1955).

Die Dämpfung von Holz wird heute im industriellen Ausmass vielfach zur Farbegalierung oder zur künstlichen Alterung des Holzes eingesetzt. Das Verfahren wird von vielen Holzhändlern angewandt.

3 Material und Methoden

Es wurde industriell von der Fa. Balz Holz AG im Autoklav behandeltes Holz geprüft. Folgende Holzarten wurden getestet:

Ahorn, Buche, Esche, Fichte, Föhre und Douglasie. Teilweise wurde auch unbehandeltes Holz der gleichen Holzart und Charge bereitgestellt. Die verschiedenen Hölzer wurden von der Firma Balz Holz AG jeweils mit den Stufen 2 und/oder 3 thermisch behandelt. Tabelle 1 zeigt die Versuchsübersicht zum geprüften Material.

Die Behandlung erfolgt im Autoklav in Inertgasatmosphäre. Die Behandlungsstufen unterscheiden sich in den Prozess-Parametern Umgebungsdruck, Restsauerstoffgehalt, Temperatur und Zeitdauer. Dabei steigt mit der Zahl der Behandlungsstufe die Behandlungsintensität. Gleichzeitig wurden aus den jeweiligen Holz-Chargen auch unbehandelte Bretter beiseite gelegt, an denen Referenzproben geprüft wurden.

Die Firma Balz Holz AG nutzt derzeit als bisher einziges Unternehmen die Behandlung im Autoklaven in Stickstoffatmosphäre. Durch den Abschluss von Sauerstoff soll die Verbrennung des Holzes unterdrückt werden. Dies wird durch ein Vakuum nach der Holzbefüllung des Autoklaven und dem anschliessenden Einfüllen von Stickstoff (Sauerstoffgereinigter Atemluft) in den Autoklaven erreicht. Behandelt wird dann mit Überdruck um den entstehenden Dampfdruck im Holz entgegenzuwirken. Damit lässt sich eine schnellere und schonendere Behandlung für das Holz erzielen. Temperatur, Zeit und Druck werden je nach Vergütungsstufe variiert. Der Prozess wird rechnergestützt gesteuert und überwacht. Der Behandlungsablauf wird dokumentiert und mit den Prozess-Parametern abgelegt. Die Grundlagen des Verfahrens wurden von Giebler (1981) publiziert.

3.1 Biegeproben

Der Zuschnitt zu den Probekörpern (l x r x t: 400 x 20 x 20mm) erfolgte durch die Fa. Balz Holz AG. Die Holzarten, resp. Behandlungsvarianten sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tab. 1 Übersicht der untersuchten Hölzer und Behandlungsarten¹⁾

Holzart		Abkürzung	Unbehandelt (= 0)	Stufe 2	Stufe 3
Ahorn	<i>Acer platanoides</i>	Ah		X	X
Buche	<i>Fagus sylvatica</i>	Bu	X	X	X
Buche „Pollmeier“ ²⁾	<i>Fagus sylvatica</i>	Bu Poll.	X	X	X
Esche	<i>Fraxinus excelsior</i>	Es	X	X	X
Fichte	<i>Picea abies</i>	Fi	X	X	
Douglasie Kern	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	DK	X	X	X
Douglasie Splint	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	DS	X	X	X
Föhre Kern	<i>Pinus sylvestris</i>	FK	X	X	X
Föhre Splint	<i>Pinus sylvestris</i>	FS	X	X	

¹⁾ wo keine Angaben vorhanden sind, stand kein unbehandeltes Material bereit

²⁾ Bei Buche „Pollmeier“ handelt es sich um Buche die von der Fa. Pollmeier/D bezogen wurde.

Es wurden folgende Prüfungen an den Biegestäben, bzw. Teilen (bei Brinell-Härte, Quellung und Wasserlagerung) von ihnen vorgenommen:

- Ultraschallgeschwindigkeit → dynamischer E-Modul aus Schallgeschwindigkeit
- Eigenfrequenz → dynamischer E-Modul aus Eigenfrequenz
- Biegeprüfung → Biegefestigkeit, Biege-E-Modul, Brucharbeit nach DIN 52186
- Rohdichte nach DIN 52182
- Farbe (radial und tangential)
- Brinell-Härte (rad. und tang.) nach DIN EN 1534
- Quellung (längs, rad. und tang.) und Sorption bei 35%, 50%, 65%, 80% und 93% rel. Luftfeuchte nach DIN 52184
- Wasserlagerung → Bestimmen der Masse und Dimensionen nach 2, 6, 8h, 1 Tag, 2, 3 Tagen, 1 Woche, 2, 4, 8 und 10 Wochen in Anlehnung an die DIN EN ISO 62

3.2 Proben für Bestimmung der pH-Werte und Extraktstoffe

5 cm lange Teilstücke der Biegestäbe wurden an die Universidad Austral de Chile geschickt, wo nach zwei unterschiedlichen Methoden der pH-Wert der Hölzer sowie die Extraktstoffe bestimmt wurden¹⁾ (Methoden der Bestimmungen: siehe Kap. 3.5 Methoden).

3.3 Proben für Wärmeleitfähigkeit

An Platten mit den Dimensionen 50 x 50 cm wurden Wärmeleitfähigkeitsmessungen durchgeführt (nach ISO 8302 bzw. EN 12667). Die Varianten hierbei waren:

- Fichte, unbehandelt
- Fichte, thermisch behandelt, Riftschnitt
- Fichte, thermisch behandelt, Jahrringlage variabel

Ergänzend wurde an Proben mit den Dimensionen 30 x 20 cm aus Buche und Esche die Wärmeleitfähigkeit mit einem anderen Gerät, welches für kleinere Probenabmessungen benutzt wird, bestimmt.

3.4 Proben für Farbmessung bezüglich Verkernung

An Platten aus teils verkernter Buche und Esche mit den Dimensionen 30 x 20 x 2 cm wurden die Farbkennwerte gemessen. Die Platten waren je hälftig unverkernt und verkernt; die Behandlungen entsprachen den Stufen 2 und 3.

3.5 Methoden

Folgende Apparaturen und Maschinen wurden für die Prüfungen verwendet:

- Ultraschall: BP-5 Ultraschallmessgerät (50kHz)
- Eigenfrequenz: Eigenfrequenzmessgerät MKS Industrial
- Biegeprüfung (3-Punkt): Zwick, Universalprüfmaschine 100kN
- Farbe: Minolta Chroma-Meter CR 200
- Brinell-Härte: Zwick, Universalprüfmaschine 100kN (Prüfkraft für Laubholz: 1000 N, für Nadelholz: 500N)

¹⁾ die Autoren danken Herr Marco Torres für die Durchführung dieser Versuche

- Gleichgewichtsfeuchte und Quellung: Messung bei 20°C und 35, 50, 65, 80, 93% rel. Luftfeuchte, Klimatisierung im Klimaschrank bis jeweilige Massekonstanz erreicht war
- Wasserlagerung: Messung nach 2, 6, 8h, 1 Tag, 2, 3 Tagen, 1 Woche, 2, 4, 8 und 10 Wochen Lagerung in Leitungswasser (das Wasser wurde alle 2 Wochen ausgewechselt und die Proben dabei jeweils unter fließendem Wasser von Hand abgewischt)
- Wärmeleitfähigkeit: Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät ,lambda-Meter EP-500', sowie Kemtherm QTM-D3 der Fa. Kyto Electronic
- pH-Wert: Methode 1: WIHS 176 / Methode 2: nach Roffael und Kossatz (1981). pH – Wert und Pufferkapazität des Holzes. Untersuchungsbericht U682/81. Fraunhofer Institut für Holzforschung.
- Extraktstoffe: vorgegangen wurde nach der TAPPI-Norm: T 204 cm-97 "Solvent extractives of wood and pulp", sowie nach der Methode von Polyak (1948).

Die Probenkörper wurden für die entsprechenden Prüfungen bis zur Massekonstanz im Normalklima gelagert (20°C und 65% rel. Luftfeuchte).

Die Berechnungen des dynamischen E-Moduls und des E-Moduls aus der Eigenfrequenz erfolgten nach folgenden zwei Gleichungen:

Dynamischer E-Modul:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$E = v^2 \cdot \rho$$

E	dynamischer E-Modul (N/mm ²)
v	Schallgeschwindigkeit (m/s)
ρ	Rohdichte (kg/m ³)

E-Modul aus Eigenfrequenz:

$$E = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot l^4 \cdot f^2 \cdot \rho}{m_n^4 \cdot i^2} \cdot \left(1 + \frac{i^2}{l^2} \cdot K_1\right) \cdot 10^{-9}$$

E	E-Modul in N/mm ²
ρ	Rohdichte in kg/m ³
l	Stablänge in mm
f	Eigenfrequenz in s ⁻¹
i	Trägheitsradius; i ² = h ² /12 (h in mm) in mm ²
h	Probendicke in mm
K ₁	Konstante (abhängig von Ordnung der Schwingung)
m _n	Konstante (abhängig von Ordnung der Schwingung)

Dabei gilt für Biegeschwingungen 1. Ordnung:

$$K_1 = 49,8$$

$$m_n^4 = 500,6$$

4 Resultate

Für die Auswertung und Darstellung wurden die untersuchten Hölzer in jeweils 2 Serien zusammengefasst. Während die erste die Holzarten Ahorn, Buche, Buche Pollmeier, Esche und Fichte enthält, befinden sich in der zweiten Serie die Douglasie und die Föhre (jeweils zusätzlich getrennt nach Splint und Kern). Die Tabelle im Anhang zeigt eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse.

4.1 Rohdichte

Die Dichten der Hölzer nehmen bei einer thermischen Behandlung gegenüber den unbehandelten Proben ab. Das Ausmass sowie der Einfluss der Behandlungsstärke zeigen aber keine einheitlichen Tendenzen; im Falle von Buche Pollmeier liegt die Dichte der mit Stufe 3 behandelten Proben sogar über jener der Stufe 2 (siehe Tab. 2). Dieser Umstand kann aber bereits vor der Behandlung vorgelegen haben. Aus technischen Gründen konnte nicht die Dichte vor der Behandlung des Holzes ermittelt werden, zum Vergleich diente lediglich unbehandeltes Holz der gleichen Charge.

Eine Abnahme der Rohdichte zeigt sich auch bei der Douglasie / Föhre, wobei ebenfalls eine Abhängigkeit von der Behandlungsstärke erkennbar ist (siehe Tab. 3). Eine Ausnahme bildet hier das Douglasien Splintholz welches von der Behandlungsstufe 2 zu 3 eine Dichtesteigerung zeigt.

Tab. 2. Rohdichten (bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchte) für Ah, Bu, Es und Fi in g/cm³. Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte 0 und *Standardabweichungen* s. Es bedeuten: 2 und 3 = Behandlungsstufe, unbeh. = unbehandeltes Vergleichsmaterial

		Ah Stufe 2 ¹⁾	Ah Stufe 3 ¹⁾	Bu unbeh.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unbeh.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unbeh.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unbeh.	Fi Stufe 2
Rohdichte [g/cm ³]	0	0.561	0.564	0.738	0.692	0.656	0.685	0.629	0.676	0.633	0.659	0.560	0.462	0.481
	s	0.011	0.024	0.018	0.030	0.031	0.023	0.021	0.014	0.028	0.032	0.047	0.049	0.080
Holzfeuchte [%]	0	6.2	5.5	10.9	9.1	8.7	10.9	7.8	5.8	10.3	8.1	5.9	11.6	9.3

¹⁾ Die Holzdatenbank der TU Dresden gibt für Ahorn unbehandelt eine Rohdichte von 0.630 g/cm³, die Datenbank/Messungen der ETH Zürich von 0.670 g/cm³ an.

Tab. 3. Rohdichten (bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchte) für Douglasie und Föhre, jeweils in Kern und Splint getrennt in g/cm³. Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte 0 und *Standardabweichungen* s. Es bedeuten: 2 und 3 = Behandlungsstufe, 0 = unbehandeltes Vergleichsmaterial

		DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
Rohdichte [g/cm ³]	0	0.484	0.477	0.466	0.526	0.443	0.475	0.553	0.543	0.516	0.588	0.546
	s	0.045	0.034	0.045	0.037	0.033	0.032	0.052	0.045	0.039	0.037	0.046
Holzfeuchte [%]	0	13.4	7.5	6.8	13.8	9.9	6.3	11.9	9.7	7.2	13.6	8.9

4.2 Ultraschall / Eigenfrequenz

Bei den E-Moduln aus Eigenschwingung und Ultraschall zeigt sich, dass die Werte für Ahorn und beide Buchenvarianten abnehmen, während sie für Esche und Fichte zunehmen. Es ist dabei nicht immer ein gleichmässiger Verlauf von „unbehandelt – Stufe 2 – Stufe 3“ festzustellen (vgl. Tab. 4). Die hier ermittelten und berechneten Werte zeigen die gleichen Tendenzen auf wie die Biege-E-Moduln welche mit der Universalprüfmaschine ermittelt wurden (vgl. Abbildungen 1 - 8).

Bei der Douglasie und der Föhre zeigen sich keinerlei eindeutige Tendenzen für die beiden Messwerte. Mit zunehmender Behandlungsstärke können die Werte einmal zunehmen und einmal abnehmen; eine Abhängigkeit von der Rohdichte der Hölzer liegt vor (vgl. Tab. 2 und 3). Tabelle 6 und 7 zeigen die Schallgeschwindigkeiten. In diese gehen die Dichte, der E-Modul und die Holzfeuchte ein. Alle 3 Kenngrössen werden durch die Wärmebehandlung beeinflusst. Die teilweise Erhöhung der Schallgeschwindigkeit ist auf diese Wechselwirkungen zurückzuführen. Innerhalb einer Holzart ergibt sich die in Abb. 1 und 2 dargestellte bekannte Korrelation Dichte-E-Modul.

Tab. 4. Berechnete E-Moduln aus Eigenfrequenz und Ultraschallgeschwindigkeit. Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte 0 und *Standardabweichungen* s. Es bedeuten: 2 und 3 = Behandlungsstufe, unbeh. = unbehandeltes Vergleichsmaterial

		Ah Stufe 2 ¹⁾	Ah Stufe 3 ¹⁾	Bu unb.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unb.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unb.	Fi Stufe 2
E-Modul Schall. [N/mm ²]	0	14893	13086	17077	14229	14982	16943	16889	16351	11713	15100	12895	15301	16466
	S	658	1366	1116	1980	1569	1178	694	949	1086	1214	1670	2738	3441
E-Modul Eigenschw. [N/mm ²]	0	12642	11294	14032	11765	13521	15137	14540	14536	10366	13408	10576	13962	14916
	S	1151	1584	764	2024	1804	1337	1118	1438	1461	1857	1377	2767	3268
Holzfeuchte [%]	0	6.2	5.5	10.9	9.1	8.7	10.9	7.8	5.8	10.3	8.1	5.9	11.6	9.3

¹⁾ Zur Berechnung dynamischen E-Moduls für Ahorn unbehandelt diente eine Schallgeschwindigkeit von 4695 m/s bei einer Dichte von 623 kg/m³ (Bucur, 1995). Dies ergibt einen Wert von 13733 N/mm².

Tab. 5. Berechnete E-Moduln aus Eigenfrequenz und Ultraschallgeschwindigkeit. Douglasie (D;), Föhre (F), K = Kern und S = Splint. Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte 0 und *Standardabweichungen* s. Es bedeuten: 2 und 3 = Behandlungsstufe, 0 = unbehandeltes Vergleichsmaterial

		DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
E-Modul Schall. [N/mm ²]	0	15343	16773	16843	18649	13870	17484	16484	17144	16579	17942	17014
	S	2321	1815	2576	2430	2257	1894	2496	3220	2232	2111	3039
E-Modul Eigenschw. [N/mm ²]	0	12246	13459	13559	15252	10960	14038	13361	13710	13559	14430	13640
	S	1737	1531	2237	2057	1999	1672	2426	2815	2034	1792	2622
Holzfeuchte [%]	0	13.4	7.5	6.8	13.8	9.9	6.3	11.9	9.7	7.2	13.6	8.9

Tab. 6. Schallgeschwindigkeiten der Hölzer und Dichte. Gruppe 1 (Ah, Bu, Es und Fi). Mittelwerte $\bar{v}$ und *Standardabweichungen* s. Es bedeuten: 2 und 3 = Behandlungsstufe, unbeh. = unbehandeltes Vergleichsmaterial

		Ah Stufe 2 ¹⁾	Ah Stufe 3 ¹⁾	Bu unbeh.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unbeh.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unbeh.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unbeh.	Fi Stufe 2
v [m/s]	$\bar{v}$	5153	4817	4809	4523	4774	4969	5183	6318	4295	4785	4788	5731	5833
	s	114	301	139	300	208	123	78	7553	128	151	139	283	249
Dichte [g/cm ³]	$\bar{\rho}$	0.561	0.564	0.738	0.692	0.656	0.685	0.629	0.676	0.633	0.659	0.560	0.462	0.481
	s	0.011	0.024	0.018	0.030	0.031	0.023	0.021	0.014	0.028	0.032	0.047	0.049	0.080

¹⁾ Für Ahorn unbehandelt gibt Bucur (1995) bei einer Dichte von 623 kg/m³ eine Schallgeschwindigkeit von 4695 m/s an.

Tab. 7. Schallgeschwindigkeiten der Hölzer und Dichte. Gruppe 2 (Douglasie und Fichte; Splint und Kern). Mittelwerte $\bar{v}$ und *Standardabweichungen* s. Es bedeuten: 2 und 3 = Behandlungsstufe, 0 = unbehandeltes Vergleichsmaterial

		DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
v [m/s]	$\bar{v}$	5621	5922	5997	5938	5576	6060	5447	5594	5655	5514	5558
	s	307	226	232	265	297	230	271	433	291	241	396
Dichte [g/cm ³]	$\bar{\rho}$	0.484	0.477	0.466	0.526	0.443	0.475	0.553	0.543	0.516	0.588	0.546
	s	0.045	0.034	0.045	0.037	0.033	0.032	0.052	0.045	0.039	0.037	0.046

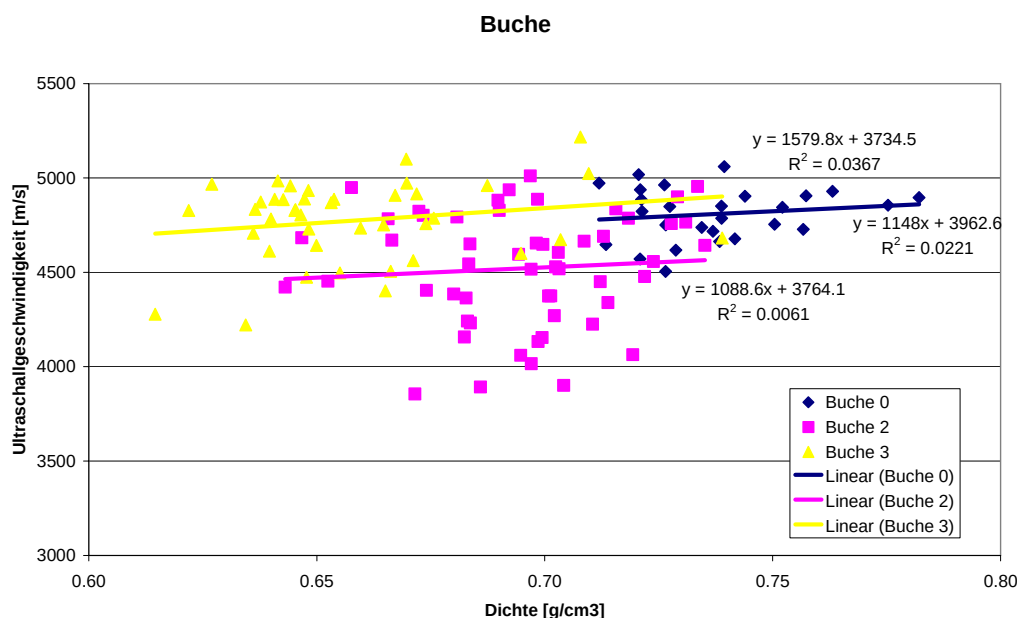


Abb. 1. Schallgeschwindigkeiten für Buche in Abhängigkeit der Dichte und Behandlungsart.

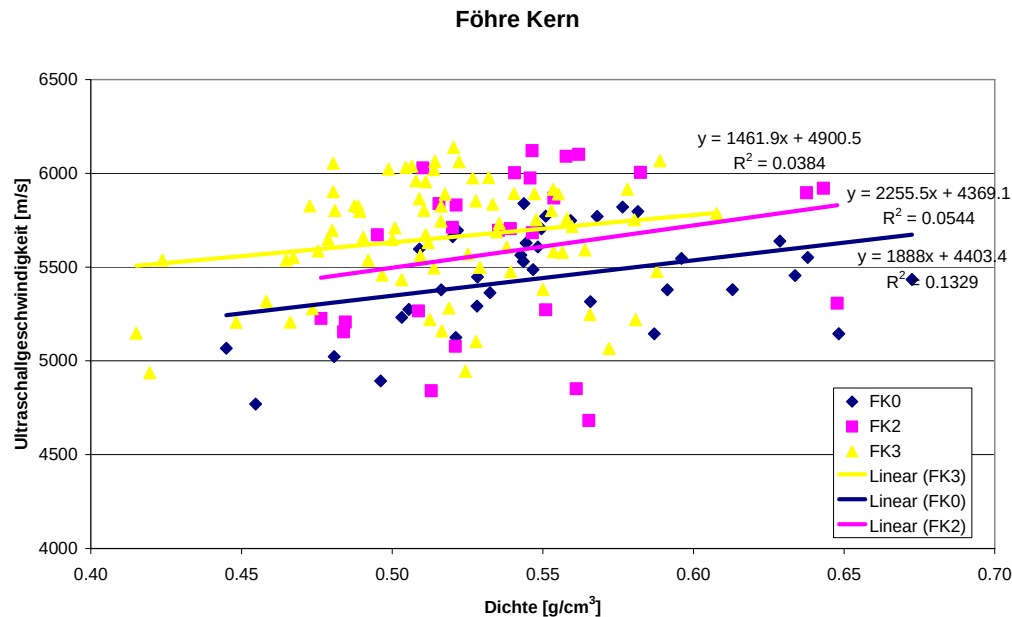


Abb. 2. Schallgeschwindigkeiten für Föhre Kern in Abhängigkeit der Dichte und Behandlungsart.

4.3 Statische Biegeprüfung

Bei der Prüfung des statischen Biege-E-Moduls nach DIN 52186 zeigte sich, dass die Werte für Ahorn und beide Buchen abnehmen, während sie für Esche und Fichte zunehmen. Es ist dabei nicht immer ein gleichmässiger Verlauf von „unbehandelt – Stufe 2 – Stufe 3“ festzustellen (vgl. Abb. 3), ein Zusammenhang mit der Rohdichte (Tab. 2 und 3) liegt vor.

Für die Douglasie und Föhre zeigen sich sowohl für Kern- als auch Splintholz keinerlei gleichmässige Tendenzen (siehe Abb. 4). Es ist lediglich erkennbar, dass eine thermische Behandlung bei der Föhre keine grossen Auswirkungen auf die erreichten Werte hat, sie liegen alle im selben Grössenbereich. Bei der Douglasie ist für den Kern eine leichte Zunahme und für den Splint eine Abnahme des Biege-E-Moduls zu verzeichnen.

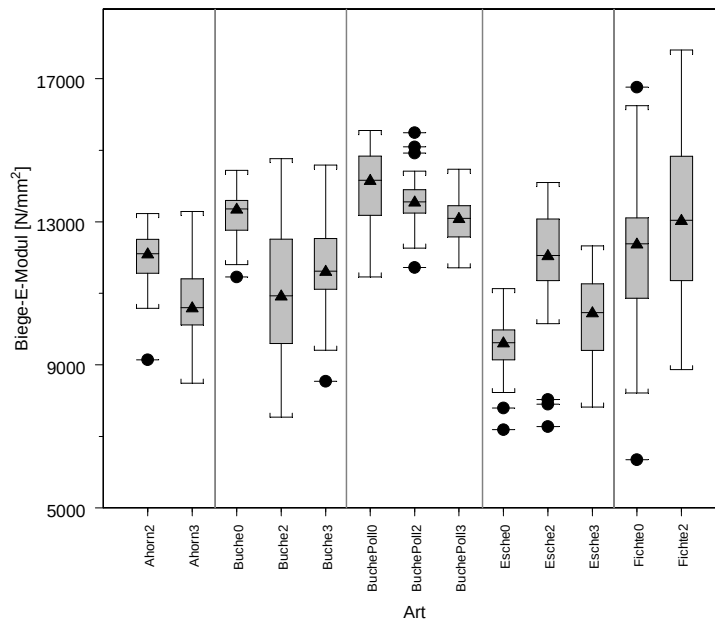


Abb. 3. Biege-E-Moduln der Gruppe 1 (Ah, Bu, Es, Fi). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Für Ahorn unbehandelt gibt die Holzdatenbank der TU Dresden einen Biege-E-Modul von 9400 N/mm² an.

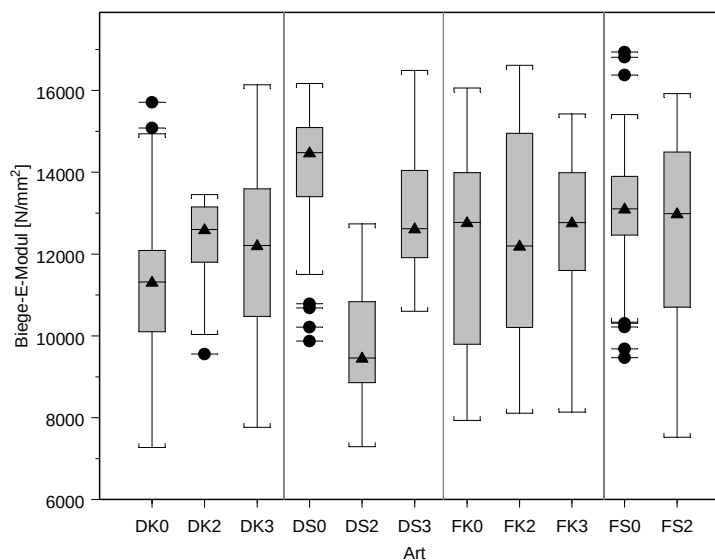


Abb. 4. Biege-E-Moduln der Gruppe 2 (Douglasie und Fichte; Splint und Kern). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

Die Biegefestigkeit der Proben nimmt mit steigender Behandlungstärke deutlich ab. Lediglich bei Esche ist bei der Behandlungsstufe 2 kein wesentlicher Festigkeitsverlust zu verzeichnen. Ausserdem zeigt die „Buche Pollmeier“ gegenüber der „Buche“ einen geringeren Abfall der Werte beim Sprung von Unbehandelt auf Stufe 2 (vgl. Abb. 5). Bezüglich Biegefestigkeiten zeigt sich bei Douglasie und Föhre eine einheitliche Abnahme der Werte, dies jedoch nicht im selben starken Masse wie bei der Serie 1 (vgl. Abb. 6).

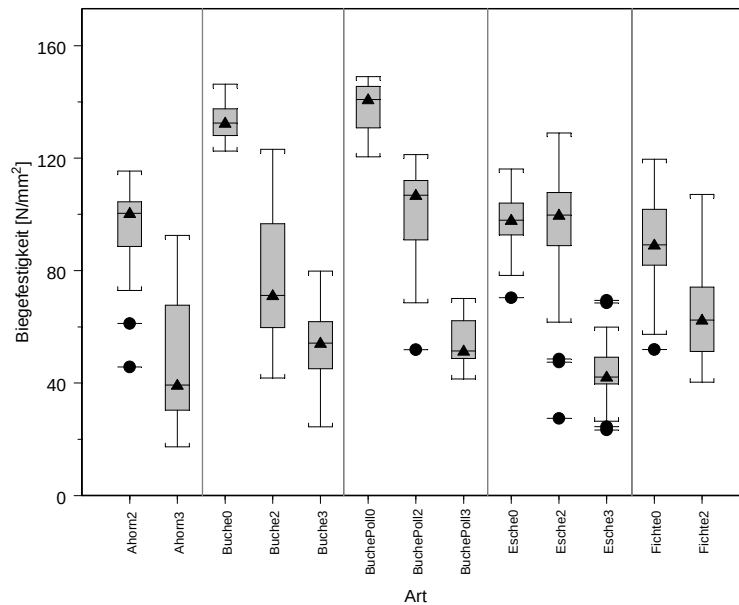


Abb. 5. Biegefestigkeit der Biegeprüfungen der Gruppe 1 (Ah, Bu, Es, Fi). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Für Ahorn unbehandelt gibt die Holzdatenbank der TU Dresden eine Biegefestigkeit von 95 N/mm² an.

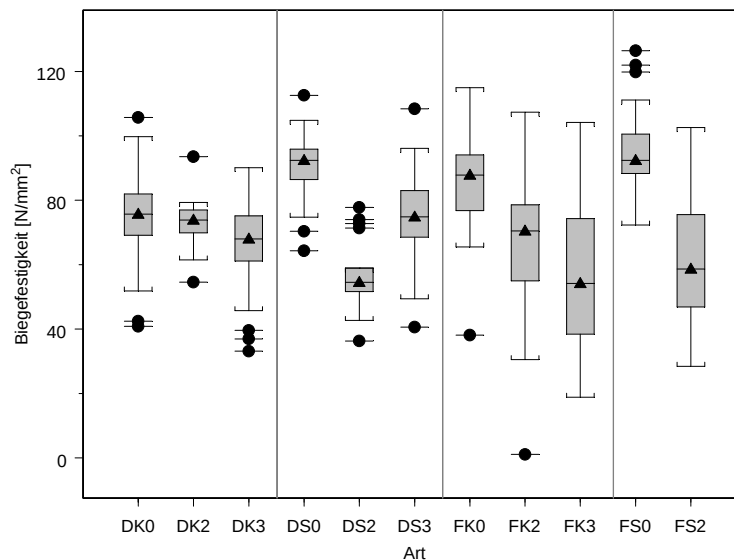


Abb. 6. Biegefestigkeit der Biegeprüfungen der Gruppe 2 (Douglasie und Fichte; Splint und Kern). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

Bei Betrachtung der Arbeit bis Bruch zeigt sich, dass diese deutlich mit zunehmender Behandlungsstärke des Holzes sinkt. Das weist darauf hin, dass die Dehnbarkeit (insbesondere die Bruchdehnung, siehe Abb. 9 und 10) des Holzes durch die Wärmebehandlung deutlich reduziert wird. Insbesondere bei den beiden Buchensortimenten ist Abnahme sehr stark. Interessanterweise liegen die Werte für alle Holzarten bei Stufe 3 etwa im selben Grössenbereich (vgl. Abb. 7). Auch bei Douglasie und Föhre zeigt sich der deutlicher Abfall bezüglich Arbeit bis Bruch. Dies sowohl bei Kern als auch bei Splint (vgl. Abb. 8).

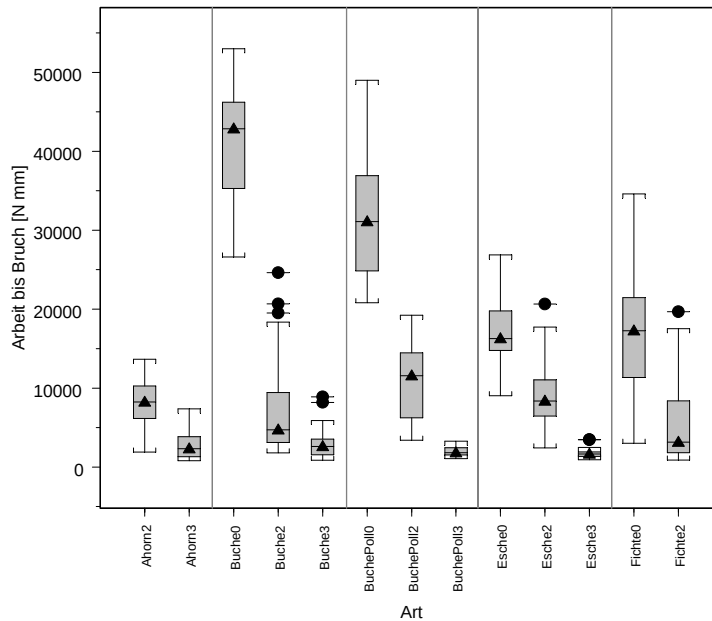


Abb. 7. Arbeit bis Bruch für Gruppe 1 (Ah, Bu, Es, Fi). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

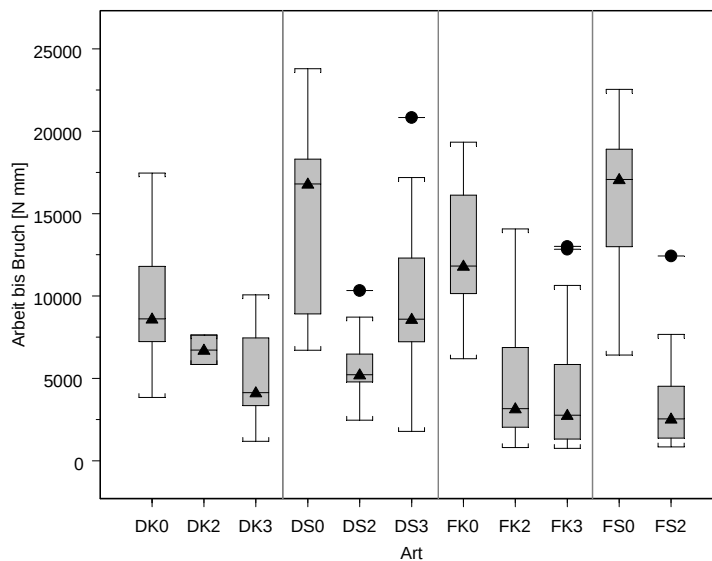


Abb. 8. Arbeit bis Bruch für Gruppe 2 (Douglasie und Fichte; Splint und Kern). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

Die behandelten Proben zeigen in Abhängigkeit der Behandlungsstärke zudem eine viel geringere Bruchdehnung als die unbehandelten Proben (vgl. Abb. 9 und 10). Die Laubhölzer zeigen aber tendenziell einen stärkeren Abfall der Werte als die untersuchten Nadelhölzer. Die behandelten Hölzer brechen bei geringerer maximaler Verformung. (Abb. 3 und 4). Das Bruchbild wird spröder, die Bruchfläche kommt zunehmend senkrecht zur Faserrichtung zu liegen (siehe Abb. 11a bis c).

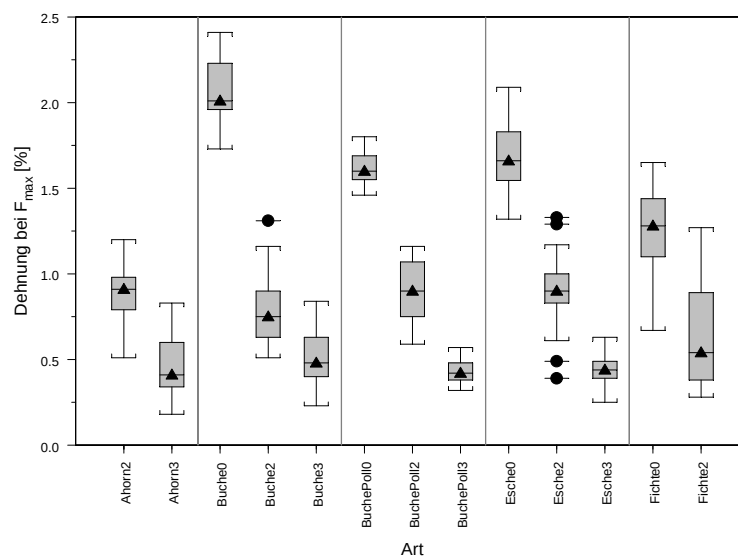


Abb. 9. Bruchdehnung bei Biegeprüfungen der Gruppe 1 (Ah, Bu, Es, Fi). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

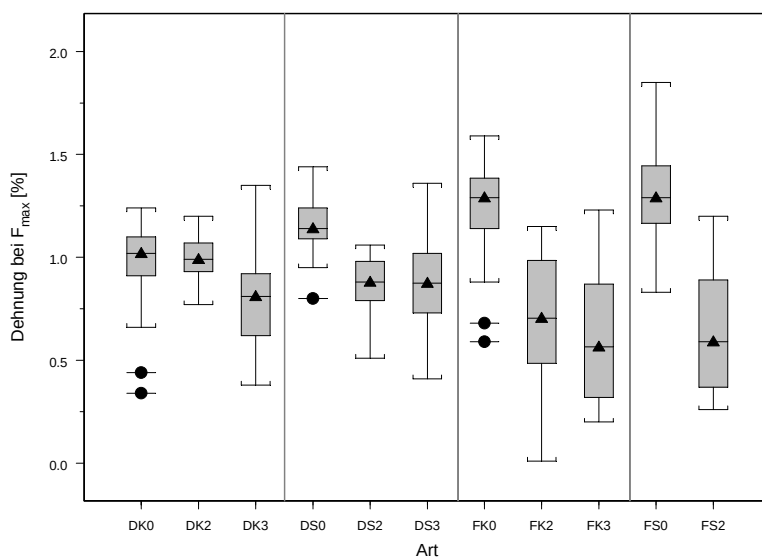


Abb. 10. Bruchdehnung bei Biegeprüfungen der Gruppe 2 (Douglasie und Fichte; Splint und Kern). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

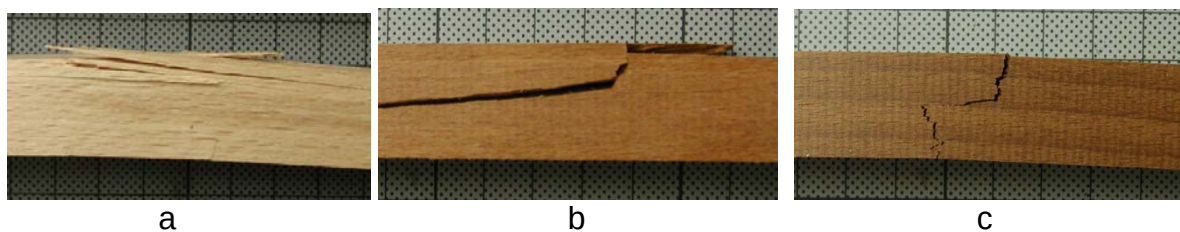


Abb. 11 Brüche am Beispiel Buche. a: Bruchbild für Buche Pollmeier unbehandelt; b: Bruchbild für Buche Pollmeier Stufe 2; c: Bruchbild für Buche Pollmeier Stufe 3

Tabelle 8 zeigt die prozentuale Änderung der Biegefestigkeit und des E-Moduls im Vergleich zum unbehandelten Holz. Während sich der E-Modul nur vergleichsweise wenig ändert (maximale Reduzierung 16%) sinkt die Biegefestigkeit deutlich (bis zu 60%). Bei Buche, Ahorn und Esche war die Reduzierung grösser als bei Douglasie und Föhre.

Tab 8. Änderung der Mittelwerte der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls in Prozent der unbehandelten Proben (Abnahme = - ; Zunahme = +). Bei Ahorn lagen keine unbehandelten Vergleichsproben vor.

	Biegefestigkeit			Biege-E-Modul		
	Unbehandelt	Stufe 2	Stufe 3	Unbehandelt	Stufe 2	Stufe 3
Ahorn	X ¹⁾	---	---	X ¹⁾	---	---
Buche	X	-42%	-59%	X	-16%	-11%
Buche „Pollmeier“	X	-27%	-61%	X	-3%	-7%
Esche	X	-1%	+55%	X	+26%	9%
Fichte	X	-30%		X	8%	
Douglasie Kern	X	-3%	-10%	X	8%	8%
Douglasie Splint	X	-37%	-17%	X	-29%	-7%
Föhre Kern	X	-22%	-35%	X	3%	3%
Föhre Splint	X	-34%		X	-4%	

¹⁾ Da kein unbehandeltes Vergleichsmaterial von Ahorn vorlag, können an dieser Stelle keine prozentuale Änderungen widergegeben werden.

4.4 Vergleich der nach unterschiedlichen Methoden ermittelten E-Moduln

Ein Vergleich der ermittelten E-Moduln zeigt, dass die durch Schallgeschwindigkeit und Eigenfrequenz berechneten (dynamischen) Werte im Vergleich zu den Werten des Biege-E-Modul mittels statischer Prüfung nach DIN tendenziell zu hoch liegen (siehe Abb. 12 bis 17). Im unteren Bereich der Werte (bis ca. 13'000 N/mm²) ist die Differenz zwischen Biege-E-Modul und E-Modul aus Eigenfrequenz aber gering. Zudem liegt in allen Fällen eine lineare Abhängigkeit der Werte zueinander vor, wobei bei grösseren E-Moduln die Differenz ansteigt. Die leicht höheren Werte aus dynamischen Tests sind seit langem bekannt.

Ein Vergleich der Werte aus Schallgeschwindigkeit und Eigenfrequenz zueinander (Abb. 14 und 17) zeigt, dass auch diese linear von einander abhängig sind. Die Korrelationskoeffizienten bei den einzelnen Vergleichen sind ziemlich hoch.

Die E-Moduln aus der Eigenfrequenz stimmen also im Allgemeinen besser mit den Werten der Biege-E-Moduln überein als die E-Moduln aus der Schallgeschwindigkeit.

$$E - \text{Modul} - \text{Schall} > E - \text{Modul} - \text{Eigenfrequenz}$$

$$E - \text{Modul} - \text{Eigenfrequenz} \geq E - \text{Modul} - \text{Biegung}$$

$$E - \text{Modul} - \text{Schall} \gg E - \text{Modul} - \text{Biegung}$$

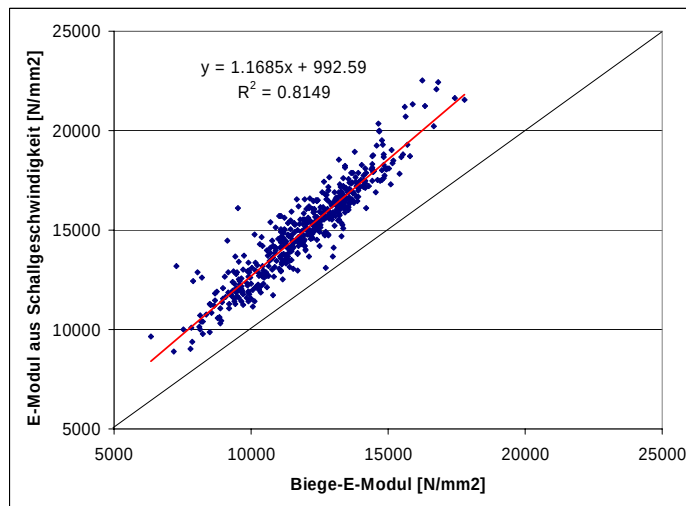


Abb.12. Vergleich der Biege-E-Moduln mit den E-Moduln aus der Schallgeschwindigkeit (alle Proben der Serie 1)

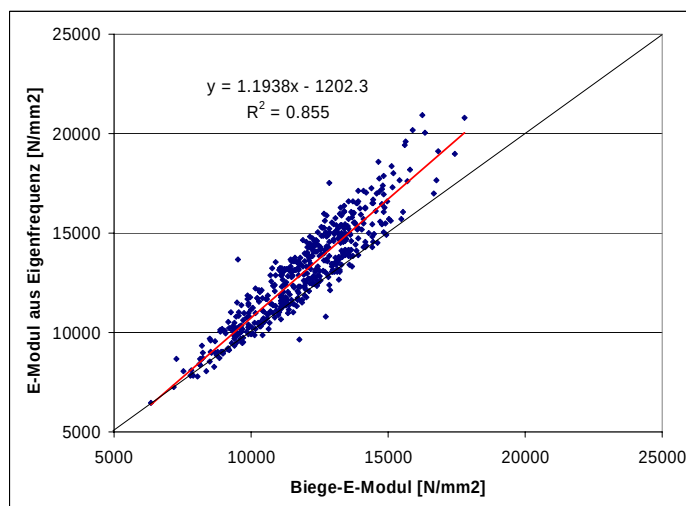


Abb. 13. Vergleich der Biege-E-Moduln mit den E-Moduln aus der Eigenfrequenz (alle Proben der Serie 1)

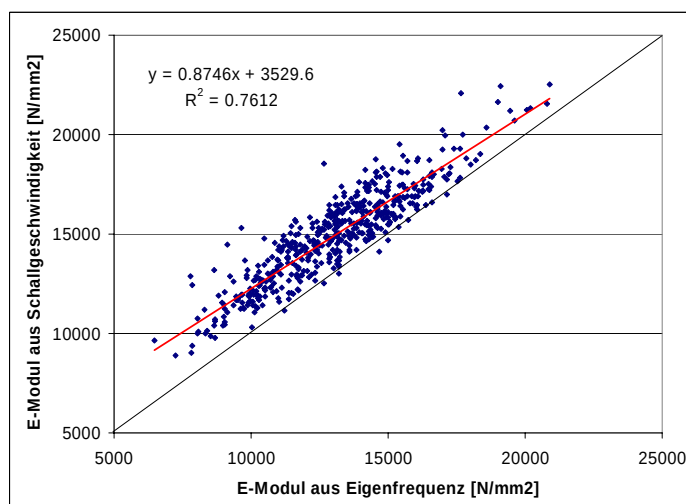


Abb.14. Vergleich der E-Moduln aus Eigenfrequenz (x-Achse) und Schallgeschwindigkeit (y-Achse) (alle Proben der Serie 1)

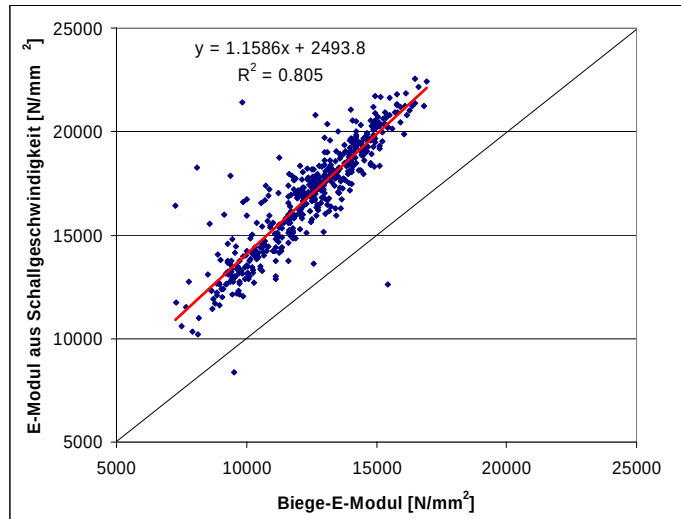


Abb. 15. Vergleich der Biege-E-Moduln mit den E-Moduln aus der Schallgeschwindigkeit (alle Proben der Serie 2)

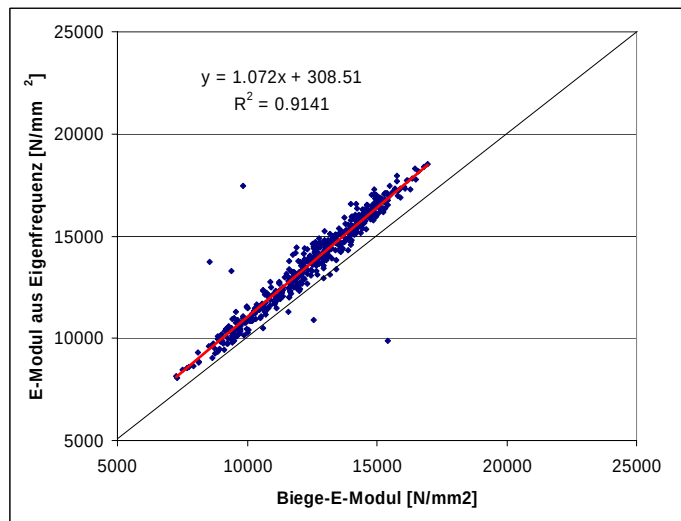


Abb. 16. Vergleich der Biege-E-Moduln mit den E-Moduln aus der Eigenfrequenz (alle Proben der Serie 2)

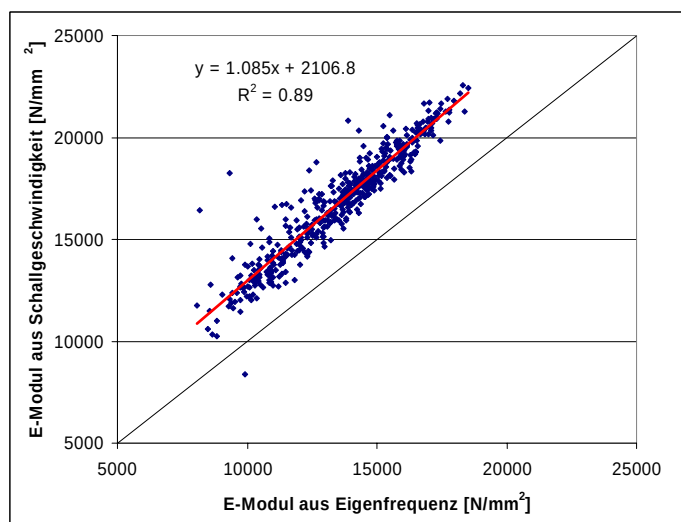


Abb. 17. Vergleich der E-Moduln aus Eigenfrequenz (x-Achse) und Schallgeschwindigkeit (y-Achse) (alle Proben der Serie 2)

4.5 Brinell-Härte

Die Messungen für Druckrichtung radial sind im Durchschnitt höher als in Druckrichtung tangential, was dem üblichen Trend entspricht (dies haben einige Arbeiten der Gruppe Holzphysik gezeigt, so z.B. Bächle 2004). Die Brinell-Härte nimmt in beiden Druckrichtungen bei zunehmender Behandlungsstärke der Hölzer ab (ausser für die Buche Pollmeier von Stufe 2 nach Stufe 3 und Esche unbehandelt nach Stufe 2). Bei diesen beiden erwähnten Ausnahmen ist die Dichte des behandelten, resp. stärker behandelten Holzes grösser, was mit einer höheren Brinell-Härte einher geht. Vgl. hierzu Tab. 9. Hier liegen die Ursachen also im unterschiedlichen Ausgangsmaterial.

Die Serie 2 zeigt ähnliche Werte; bei stärkerer thermischer Behandlung nimmt die Brinell-Härte ab. Lediglich bei Douglasie Splint sind die Werte für Stufe 3 deutlich höher als für Stufe 2 (siehe Tab. 10). Ein Umstand der aber bereits vor der Behandlung vorgelegen haben dürfte da die mittlere Dichte von Douglasie Splint Stufe 3 trotz der stärkeren therm. Behandlung deutlich grösser ist als jene von Douglasie Splint Stufe 2.

Die Prüflast für die Serie 1 (Ah, Bu, Es und Fi) betrug 1000 N (Ausnahme Fichte: 500 N). Für die Serie 2 (Dou und Fö) wurde mit 500 N gefahren. Die unterschiedlichen Prüflasten für Laub- und Nadelholz sind durch die geringere Härte der Nadelhölzer bedingt.

Tab. 9. Brinellhärten HbE (Mittelwerte $\bar{0}$ und *Standardabweichungen* s) für Ah, Bu, Es und Fi. Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

		Ah Stufe 2 ¹⁾	Ah Stufe 3 ¹⁾	Bu unb.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unb.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unb.	Fi Stufe 2
Brinell-Härte HbE [N/mm ²] Druckrichtung tangential	$\bar{0}$	22.4	17.5	39.3	29.5	16.6	35.5	23.1	24.8	33.2	36.7	20.0	19.5	17.6
	s	1.5	1.4	2.8	2.0	1.3	1.2	2.2	2.2	2.6	3.6	2.6	4.1	3.0
Brinell-Härte HbE [N/mm ²] Druckrichtung radial	$\bar{0}$	30.4	25.1	42.4	34.6	20.5	36.5	26.9	31.7	36.9	33.4	24.1	15.8	14.3
	s	2.2	2.5	3.5	3.7	1.3	1.7	2.8	3.5	9.7	6.3	6.2	3.0	5.7
Holzfeuchte [%]	$\bar{0}$	6.2	5.5	10.9	9.1	8.7	10.9	7.8	5.8	10.3	8.1	5.9	11.6	9.3
Rohdichte [kg/m ³]	$\bar{0}$	561	564	738	692	656	685	629	676	633	659	560	462	481

¹⁾ Die Werte für Ahorn unbehandelt werden in der Holzdatenbank der TU Dresden sowohl radial als auch tangential mit 26 N/mm² beziffert.

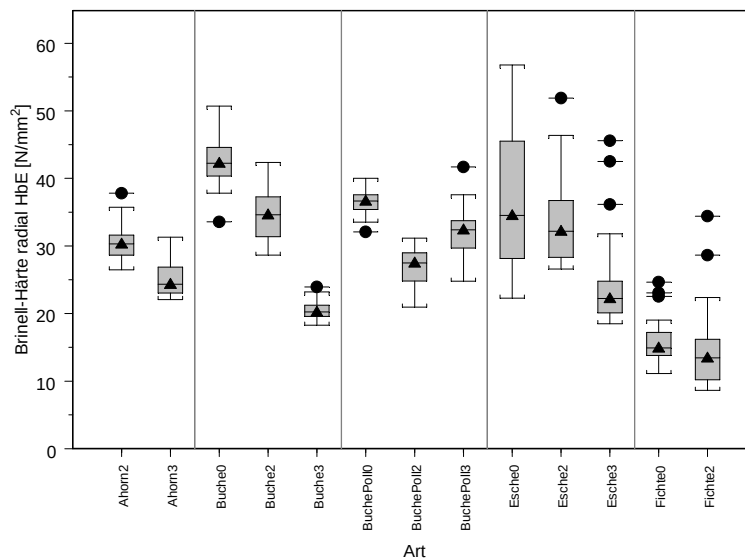


Abb. 18. Brinellhärten HbE radial für Ah, Bu, Es und Fi. Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Der Wert für Ahorn unbehandelt radial wird in der Holzdatenbank der TU Dresden mit 26 N/mm² angegeben.

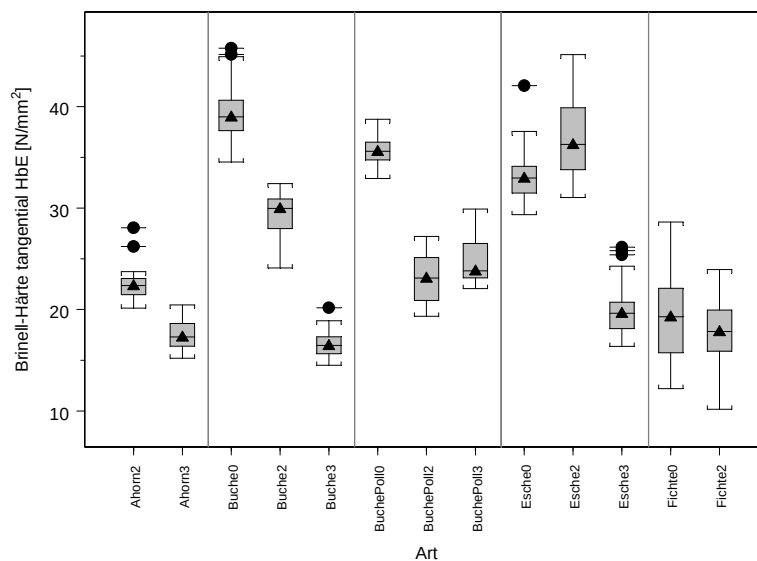


Abb. 19. Brinellhärten HbE tangential für Ah, Bu, Es und Fi. Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Der Wert für Ahorn unbehandelt tangential wird in der Holzdatenbank der TU Dresden mit 26 N/mm² angegeben.

Tab 10. Brinellhärten HbE (Mittelwert und *Standardabweichung*) für Douglasie und Föhre, jeweils Kern und Splint. Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

		Dou Kern 0	Dou Kern 2	Dou Kern 3	Dou Splint 0	Dou Splint 2	Dou Splint 3	Fö Kern 0	Fö Kern 2	Fö Kern 3	Fö Splint 0	Fö Splint 2
Brinell-Härte HbE [N/mm ²] Druckrichtung tangential	0	20.3	11.8	11.7	21.3	11.0	15.9	16.6	16.4	14.1	18.3	13.7
	s	6.0	2.2	3.5	6.9	2.6	5.1	2.6	6.3	2.2	3.2	2.9
Brinell-Härte HbE [N/mm ²] Druckrichtung radial	0	22.1	17.3	13.8	25.4	12.9	20.0	19.8	21.0	17.2	22.0	19.6
	s	10.6	1.9	2.4	4.0	2.6	2.8	3.3	2.9	1.4	2.4	4.5
Holzfeuchte [%]	0	12.9	9.7	7.2	13.0	9.1	7.4	12.6	9.4	6.9	13.0	9.4
Rohdichte [kg/m ³]	0	484	477	466	526	443	475	552	543	516	588	546

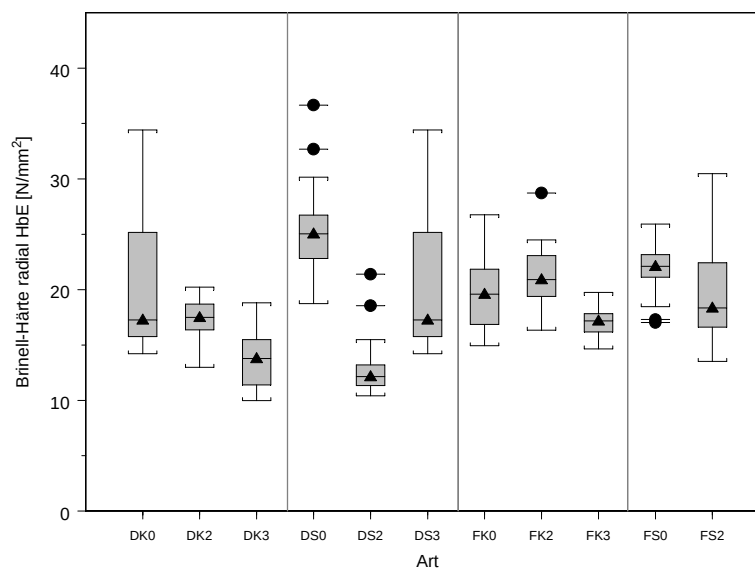


Abb. 20. Brinellhärten HbE radial für Douglasie und Fichte (Splint und Kern). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

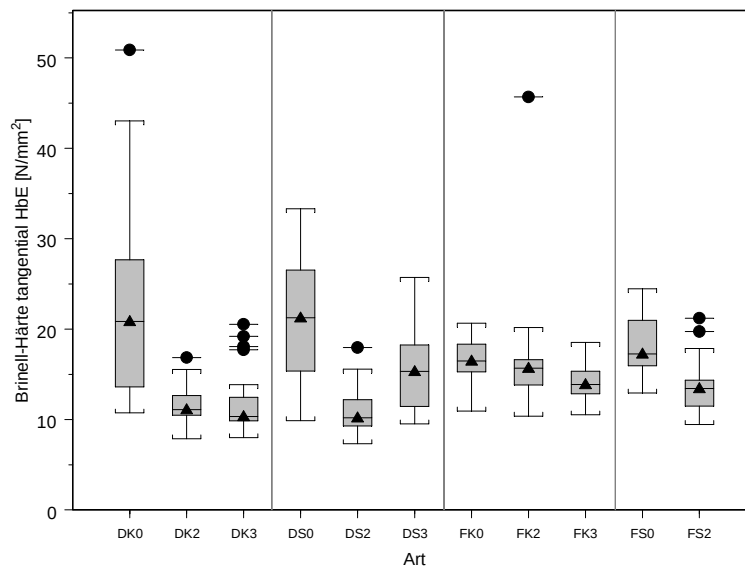


Abb. 21. Brinellhärten HbE tangential für Douglasie und Fichte (Splint und Kern). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang.

Tabelle 11 zeigt die prozentuale Abnahme der Härte im Vergleich zum unbehandelten Holz. Die Härte sinkt deutlich ab. Ein einheitlicher Trend der Behandlungsintensität ist nicht immer erkennbar. Hierfür dürften Dichteunterschiede vor der Behandlung des Holzes verantwortlich sein. In Laborversuchen konnte eine einheitliche Tendenz nachgewiesen werden.

Tab 11. Prozentuale Abnahme der Mittelwerte der Brinellhärten HbE in Prozent von unbehandelten Proben ¹⁾.

	Brinell-Härte tangential			Brinell-Härte radial		
	Unbehandelt	Stufe 2	Stufe 3	Unbehandelt	Stufe 2	Stufe 3
Ahorn	X ²⁾	---	---	X ²⁾	---	---
Buche	X	-25%	-58%	X	-18%	-52%
Buche „Pollmeier“	X	-35%	-30%	X	-26%	-13%
Esche	X	+11%	-40%	X	-9%	-35%
Fichte	X	-9%		X	-9%	
Douglasie Kern	X	-42%	-42%	X	-22%	-37%
Douglasie Splint	X	-48%	-25%	X	-49%	-21%
Föhre Kern	X	-1%	-15%	X	+6%	-13%
Föhre Splint	X	-25%		X	-11%	

¹⁾ die prozentualen Änderungen wurden immer auf die Varianten mit X bezogen

²⁾ da kein unbehandeltes Vergleichsmaterial von Ahorn vorlag, können an dieser Stelle keine prozentuale Änderungen wiedergegeben werden.

4.6 Quellung / Sorption

Die Messungen der radialen und tangentialen Quellung sowie der Holzfeuchte zeigen einen klaren Einfluss der thermischen Behandlung. Durch die Vergütung kann das Quellen in beiden Richtungen um bis zu 50% vermindert werden (Tabellen 12 und 13). Die Holzfeuchte der behandelten Proben liegt um rund 40% unter jener von unbehandelten Vergleichsproben. Dabei liegen die Werte der jeweiligen Behandlungsstufen relativ nahe beieinander, sind aber deutlich von den anderen Behandlungsstufen unterscheidbar (vgl. Abb. 22 und 23).

Die Quellung in Längsrichtung wird nicht wiedergegeben, da sich diese (bei vorliegenden Prüfkörpern) nur im Bereich von Zehntelmillimetern oder sogar kleiner verändert hat. Eine genügend gute Messgenauigkeit bei der verwendeten Messapparatur ist dabei nicht gegeben.

Tab. 12 Quellung der Serie 1 (Ah, Bu, Es und Fi) in radialer und tangentialer Richtung (in %, bezogen auf Dimension bei Darrzustand)

Radial					
Temperatur [°C] / rel. Luftfeuchte [%].					
Serie	20/35	20/50	20/65	20/80	20/93
Ahorn St.2	0.5%	0.6%	0.9%	1.4%	2.1%
Ahorn St.3	0.9%	1.4%	1.5%	1.8%	3.3%
Buche unb.	1.0%	1.1%	1.7%	2.8%	4.4%
Buche St.2	1.0%	1.1%	1.5%	2.5%	2.9%
Buche St.33	0.8%	0.8%	1.1%	1.9%	2.6%
Buche Poll unb.	1.3%	1.2%	2.0%	3.4%	5.5%
Buche Poll St.2	1.0%	0.8%	1.4%	2.1%	3.1%
Buche Poll St.3	0.7%	0.8%	1.1%	1.7%	2.1%
Esche St.2	0.8%	0.9%	1.2%	2.1%	3.2%
Esche St.3	0.4%	0.5%	0.8%	1.2%	1.5%
Fichte unb.	1.1%	1.3%	1.8%	2.8%	4.0%
Fichte St.2	0.8%	0.8%	1.2%	1.9%	2.5%
Tangential					
Serie	20/35	20/50	20/65	20/80	20/93
Ahorn St.2	1.0%	1.1%	1.4%	2.5%	3.7%
Ahorn St.3	0.7%	0.9%	1.2%	2.5%	3.1%
Buche unb.	1.5%	1.5%	2.6%	5.3%	9.5%
Buche St.2	1.5%	1.5%	2.2%	4.0%	6.4%
Buche St.3	1.4%	1.5%	2.0%	3.6%	5.7%
Buche Poll unb.	1.4%	1.4%	2.7%	4.7%	8.2%
Buche Poll St.2	1.5%	1.5%	2.1%	4.0%	7.0%
Buche Poll St.3	1.1%	1.2%	1.6%	3.0%	4.1%
Esche St.2	1.2%	1.4%	1.8%	3.6%	6.2%
Esche St.3	0.9%	1.0%	1.4%	2.3%	3.8%
Fichte unb.	1.9%	2.3%	3.0%	4.7%	7.1%
Fichte St.2	1.2%	1.3%	1.8%	3.0%	3.9%

Tab. 13 Quellung der Serie 2 (Douglasie und Föhre, jeweils Kern und Splint) in radialer und tangentialer Richtung (in %, bezogen auf Dimension bei Darrzustand)

Radial					
Temperatur [°C] / rel. Luftfeuchte [%]					
Serie	20/35	20/50	20/65	20/80	20/93
DK0	0.8%	1.0%	1.4%	2.0%	2.2%
DK2	0.7%	0.9%	1.5%	2.1%	2.9%
DK3	0.4%	0.6%	0.9%	1.1%	1.7%
DS0	1.0%	1.3%	2.1%	2.8%	3.9%
DS2	0.4%	0.7%	1.1%	1.2%	1.8%
DS3	0.5%	0.8%	1.2%	1.5%	2.1%
FK0	0.7%	1.3%	1.8%	2.2%	2.9%
FK2	0.7%	1.0%	1.5%	1.9%	2.8%
FK3	0.5%	0.7%	1.0%	1.3%	1.4%
FS0	1.0%	1.5%	2.1%	2.8%	4.0%
FS2	0.6%	1.0%	1.2%	1.9%	2.2%

Tangential					
Temperatur [°C] / rel. Luftfeuchte [%]					
Serie	20/35	20/50	20/65	20/80	20/93
DK0	1.5%	1.9%	2.8%	4.0%	5.9%
DK2	1.1%	1.4%	2.2%	3.0%	4.6%
DK3	0.9%	1.1%	1.8%	2.6%	3.8%
DS0	1.4%	2.0%	3.0%	4.4%	6.3%
DS2	0.7%	0.9%	1.6%	2.4%	4.0%
DS3	1.0%	1.2%	2.1%	2.8%	4.3%
FK0	1.4%	1.7%	3.1%	4.2%	6.3%
FK2	1.0%	1.4%	2.2%	3.1%	4.8%
FK3	0.8%	1.1%	1.7%	2.4%	3.4%
FS0	1.4%	2.0%	3.0%	4.5%	6.5%
FS2	1.0%	1.4%	1.9%	3.2%	5.2%

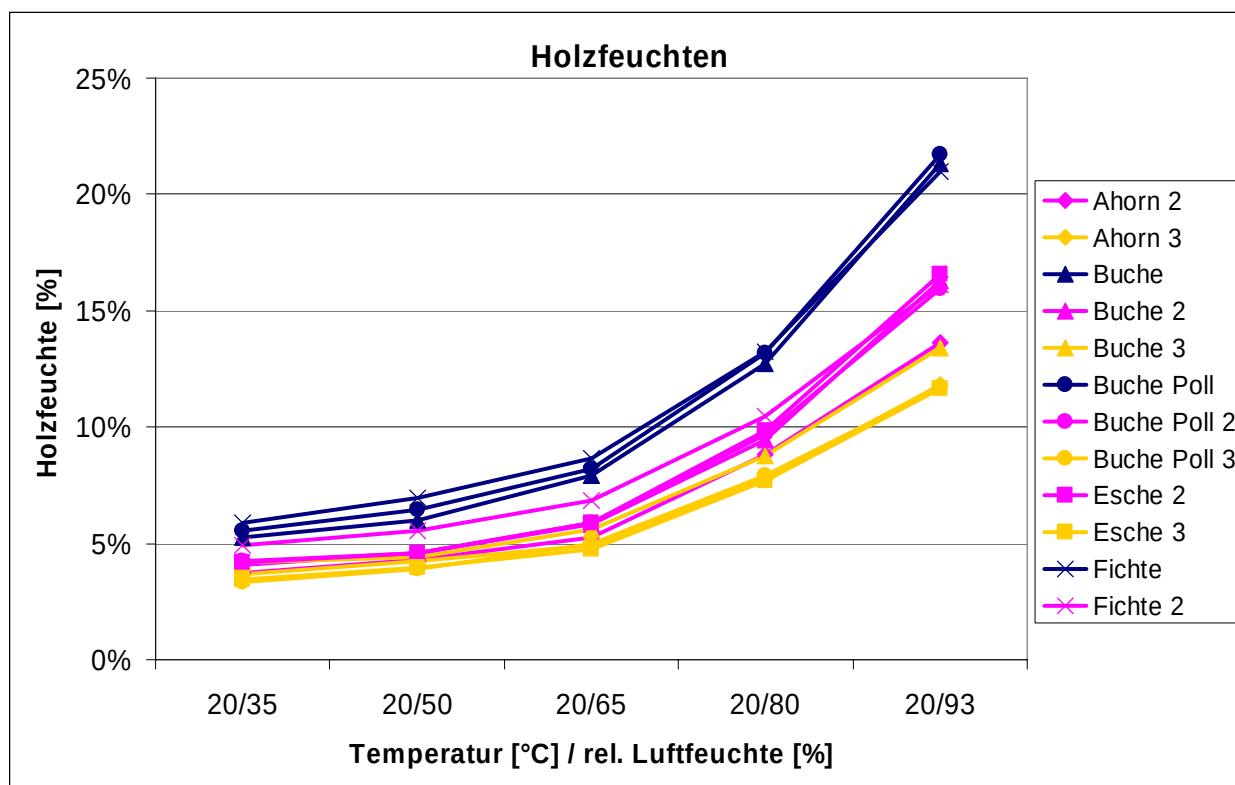


Abb. 22 Holzfeuchtigkeiten der Serie 1 (Ah, Bu, Es und Fi) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte

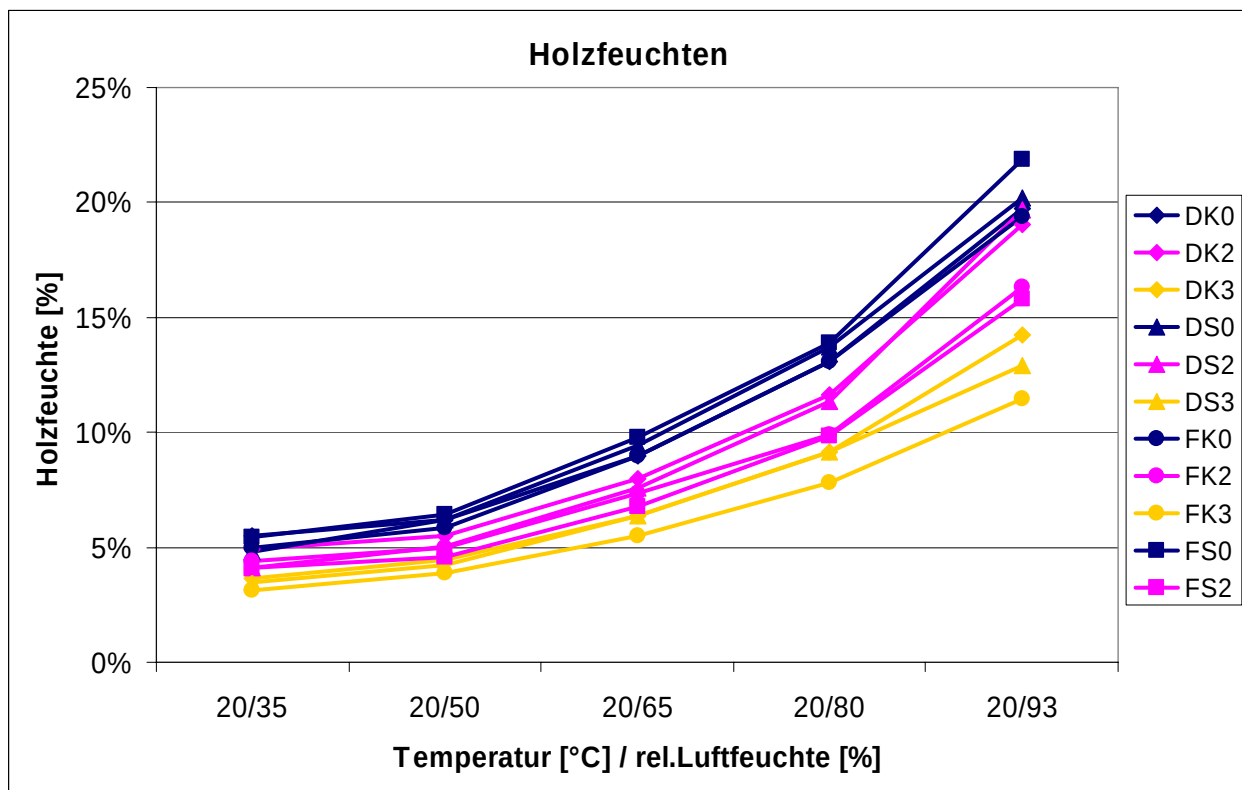


Abb. 23 Holzfeuchtigkeiten der Serie 2 (Douglasie und Föhre, jeweils Kern und Splint) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte

4.7 Wasserlagerung

Die Dimensionsmessungen in radialer und tangentialer Richtung zeigen deutliche Unterschiede zwischen den behandelten und unbehandelten Proben. Nach rund 2 Wochen Wasserlagerung pendeln sich die Werte auf deutlich unterschiedlichen Niveaus ein (vgl. hierzu Abb. 24 und 25), nehmen aber in der Folge immer noch leicht zu. Die Unterschiede zwischen behandelt und unbehandelt fallen dabei für die tangentialen Messungen grösser aus als in radialer Richtung (siehe Tabelle 14 + 15). Die absoluten Quellmasse sind in tangentialer Richtung zudem grösser als in radialer Richtung; dies entspricht aber den allgemeinen Erkenntnissen von unbehandeltem Holz.

Die Resultate der Dimensionsmessungen in Längsrichtung der Proben nicht ermittelt, da diese Werte sehr gering sind und praktisch weniger Bedeutung haben.

Die Holzfeuchten sind bis zum Ende der Messserie (10 Wochen) im steigen begriffen (absolute Werte, vgl. hierzu Abb. 26). Die Grössenordnungen der Unterschiede zwischen den behandelten sowie den unbehandelten Proben bleiben dabei nach etwa 1 Woche Wasserlagerung konstant (Tabellen 16a und 16b).

Bei der Föhre und Douglasie zeigt sich zudem leicht, dass das Splintholz in unbehandeltem Zustand vor allem zu Beginn schneller quillt als das Kernholz. Die thermische Behandlung zeigt aber auch hier den Effekt der verminderten Quellung.

Die teilweise vorhandenen leichten Schwankungen in der Wasseraufnahme liegen im Bereich der Messgenauigkeit. Insbesondere beim Wiegen kann es durch anhaftendes Wasser zu Messfehlern kommen.

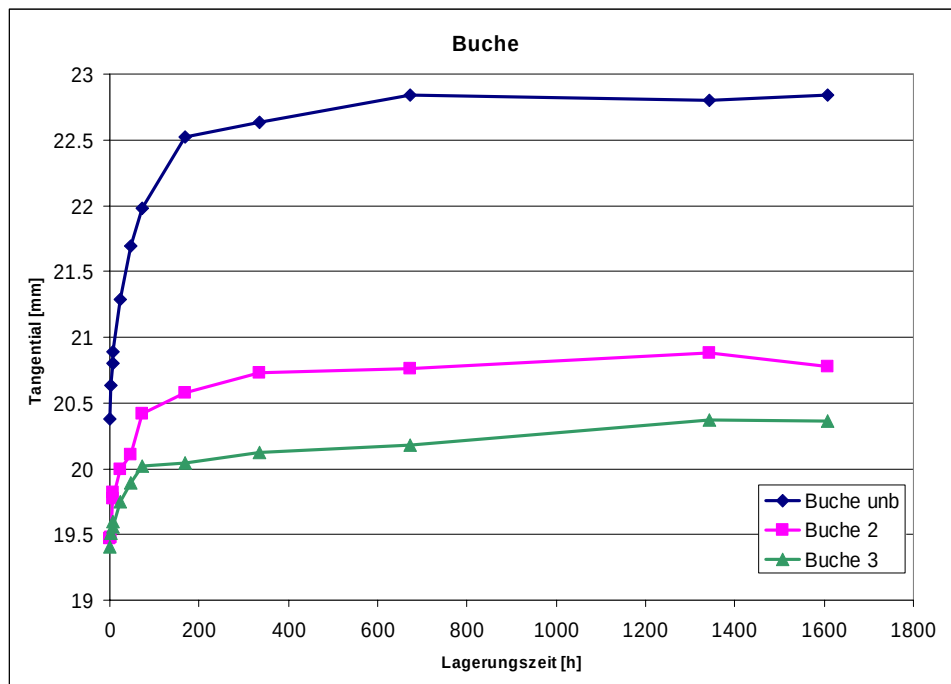


Abb. 24. Änderung der tangentialen Masse während rund 10 Wochen Wasserlagerung am Beispiel der Buche (Absolute Werte)

Tab. 14 Tangentiale Quellung in % bezogen auf Dimension bei 20°C / 65% r.L. bei 10 Wochen Wasserlagerung als Funktion der Lagerdauer

	Ah St.2	Ah St. 3	Bu unb.	Bu St. 2	Bu St. 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. St. 2	Bu Poll. St. 3	Es unb.	Es St. 2	Es St. 3	Fi unb.	Fi St. 2	DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
Normal-klima																								
2 h	0.1	0.4	1.2	0.1	0.5	1.4	1.2	1.0	2.0	0.2	0.5	0.7	0.2	0.4	0.4	0.0	1.2	0.2	0.0	0.0	4.4	0.0	5.8	0.6
6 h	0.8	1.2	2.1	1.8	1.0	2.2	1.6	1.1	3.0	1.0	1.0	1.9	0.6	1.5	0.3	0.1	2.4	0.2	0.3	1.6	3.9	0.2	6.2	1.2
8 h	1.3	0.5	2.5	1.5	0.8	1.9	0.9	0.8	3.5	1.3	0.5	2.1	1.2	1.9	0.3	0.0	2.9	0.6	0.3	1.3	3.9	0.3	6.8	0.8
24 h (1 Tag)	2.1	0.9	4.5	2.7	1.8	4.0	2.6	2.1	5.2	2.9	1.9	3.6	2.3	2.5	0.9	1.2	3.3	0.6	0.3	3.6	3.9	1.0	6.3	2.1
48 h (2 Tage)	2.5	1.3	6.4	3.3	2.5	5.7	4.3	2.8	6.8	3.2	1.7	4.3	2.4	3.3	2.2	0.7	4.4	1.0	0.7	4.7	3.9	0.8	6.6	1.9
72 h (3 Tage)	3.0	1.5	7.9	4.9	3.1	6.2	5.0	2.5	7.3	4.2	2.1	4.9	2.6	3.8	2.5	1.5	4.1	1.2	0.3	4.7	4.3	1.3	6.4	2.7
168 h (1 Woche)	3.9	2.0	10.5	5.7	3.2	8.1	6.8	4.1	7.8	5.8	3.0	5.7	3.5	3.7	2.1	1.2	4.2	1.7	1.2	5.1	4.4	1.8	6.5	2.5
336 h (2 Wochen)	4.2	2.5	11.0	6.5	3.7	8.1	7.4	3.9	8.6	6.5	3.2	5.2	3.6	3.9	2.5	1.1	4.6	1.4	1.5	4.9	3.9	2.3	6.7	2.6
672 h (4 Wochen)	4.6	2.8	12.1	6.6	4.0	8.8	8.3	3.8	8.7	7.0	3.3	6.3	3.9	4.4	2.1	1.8	4.7	1.7	2.1	5.0	4.2	2.0	6.4	2.8
1344 h (8 Wochen)	4.9	2.8	11.9	7.2	4.9	8.8	8.3	4.3	8.9	7.1	3.6	6.5	4.3	4.4	2.4	1.2	4.8	1.6	3.6	5.4	4.9	2.5	6.9	3.0
1608 h (10 Wochen)	4.7	3.7	12.1	6.7	4.9	9.0	8.6	4.4	8.6	7.3	3.5	6.0	4.1	4.7	2.3	1.2	4.3	2.3	3.6	5.2	5.0	2.2	6.8	3.1

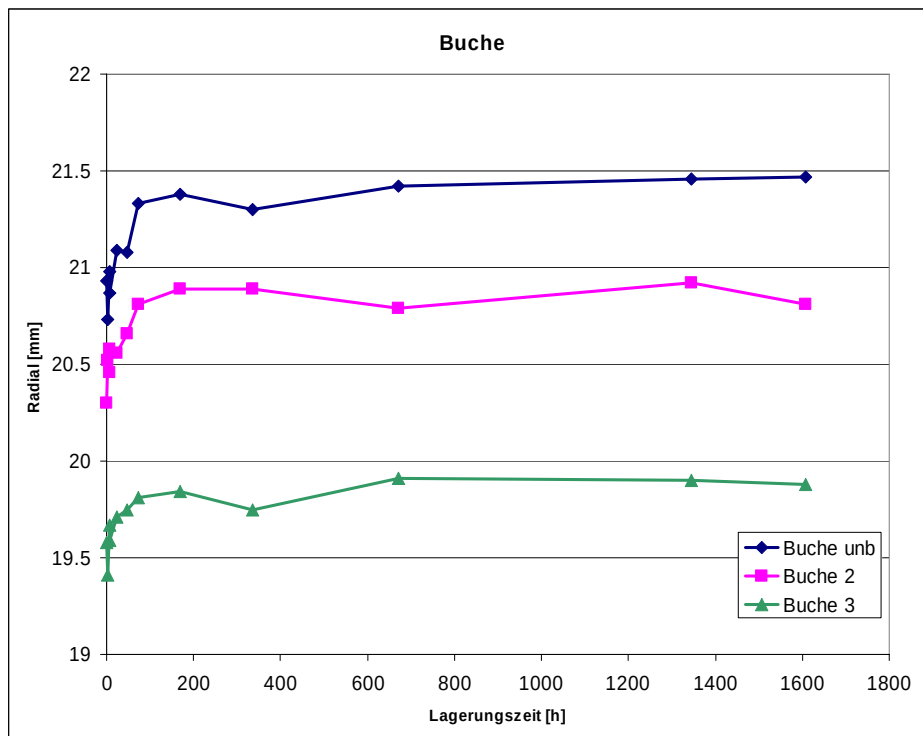


Abb. 25. Änderung der radialen Masse während rund 10 Wochen Wasserlagerung am Beispiel der Buche (Absolute Werte)

Tab. 15 Radiale Quellung in % bezogen auf die Dimensionen bei 20°C / 65% r.L. bei 10 Wochen Wasserlagerung als Funktion der Lagerdauer

	Ah St.2	Ah St. 3	Bu unb.	Bu St. 2	Bu St. 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. St. 2	Bu Poll. St. 3	Es unb.	Es St. 2	Es St. 3	Fi unb.	Fi St. 2	DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
Normal-klima																								
2 h	0.0	0.2	0.0	1.1	0.0	1.7	0.0	1.1	0.3	0.5	0.1	0.5	0.7	1.8	0.2	0.0	0.9	0.4	0.0	0.0	1.6	0.8	3.1	0.5
6 h	0.0	0.3	0.2	0.8	0.5	1.3	0.1	1.1	0.8	0.7	0.1	0.3	0.8	0.9	0.3	0.4	2.5	0.6	0.0	0.5	1.9	0.1	3.5	1.1
8 h	0.1	0.5	0.0	1.4	0.1	1.5	0.2	1.6	0.8	0.5	0.6	0.9	0.8	1.6	0.3	0.4	1.7	0.7	0.3	0.2	1.8	0.2	3.2	1.2
24 h (1 Tag)	0.6	0.8	0.8	1.3	0.7	1.9	1.1	0.9	1.3	1.3	0.6	1.4	0.5	1.9	0.8	0.5	2.5	1.0	0.8	0.8	2.1	0.1	3.1	1.4
48 h (2 Tage)	1.1	1.0	0.7	1.8	0.9	2.8	1.6	1.2	1.4	1.3	0.6	2.1	0.9	2.6	0.9	0.6	2.5	1.4	0.6	1.3	1.9	0.4	3.4	1.3
72 h (3 Tage)	0.9	0.9	1.9	2.5	1.2	3.4	1.4	1.6	1.6	1.4	0.9	1.9	1.6	2.7	1.7	0.7	2.7	1.7	0.9	2.3	1.9	0.9	3.2	1.5
168 h (1 Woche)	1.3	1.1	2.2	2.9	1.3	4.5	2.0	1.9	2.4	2.2	1.0	2.2	1.5	2.7	1.6	0.9	2.8	1.7	0.8	1.2	2.2	0.9	3.7	1.7
336 h (2 Wochen)	1.3	1.6	1.8	2.9	0.9	4.9	2.0	2.0	2.0	2.5	0.8	2.3	1.3	2.5	1.4	1.0	2.9	1.7	0.7	1.7	2.3	1.5	3.2	2.1
672 h (4 Wochen)	1.5	1.7	2.3	2.4	1.7	4.9	2.2	2.1	2.1	2.5	0.7	2.6	1.8	3.0	2.0	0.9	3.4	2.1	1.2	1.8	2.6	1.1	3.5	2.0
1344 h (8 Wochen)	1.8	2.1	2.5	3.1	1.6	5.2	2.3	2.4	1.9	2.9	0.6	2.3	1.3	3.1	1.8	0.7	3.4	2.6	1.1	1.7	2.7	1.3	3.3	1.7
1608 h (10 Wochen)	1.6	2.0	2.6	2.5	1.5	5.1	2.8	2.2	2.1	2.9	1.2	2.7	2.1	2.4	1.4	1.0	3.1	2.3	1.1	1.5	2.4	1.4	3.6	2.1

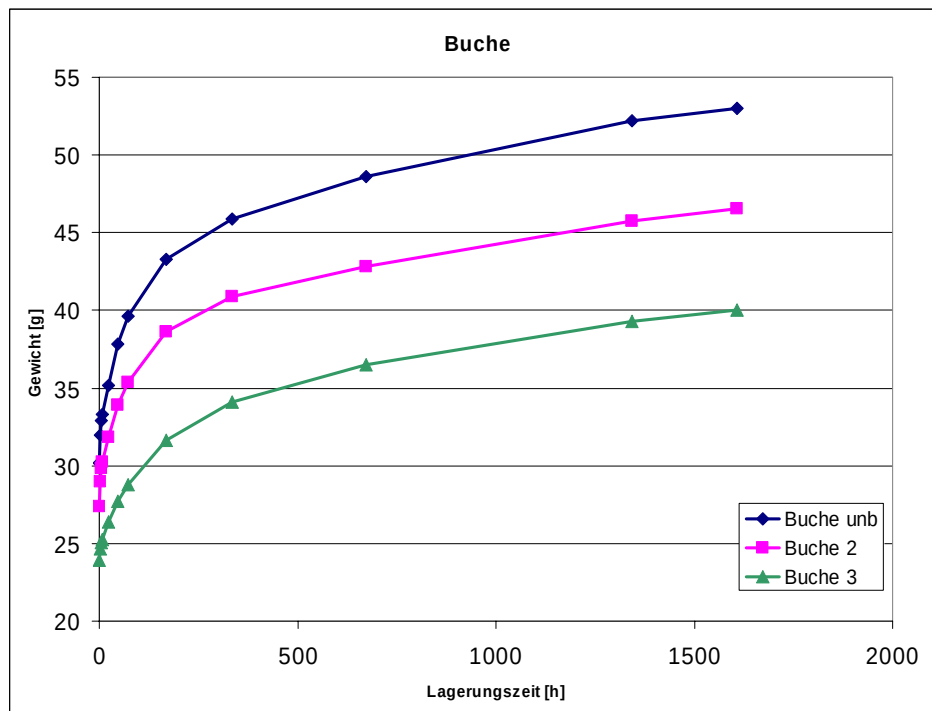


Abb. 26. Änderung der Probenmasse während rund 10 Wochen Wasserlagerung am Beispiel der Buche (Absolute Werte)

Tab. 16a Änderungen der Holzfeuchte in % bezogen auf Feuchte bei 20°C / 65% r.L. bei 10 Wochen Wasserlagerung als Funktion der Lagerdauer

	Ah St.2	Ah St.3	Bu unb.	Bu St.2	Bu St.3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. St.2	Bu Poll. St.3	Es unb.	Es St.2	Es St.3	Fi unb.	Fi St.2
Holzfeuchte in %													
Normalklima	10	8	9	13	7	9	11	7	11	10	7	10	9
2 h	+8	+8	+7	+7	+3	+7	+10	+6	+12	+6	+5	+17	+13
6 h	+12	+12	+10	+10	+5	+10	+15	+9	+18	+10	+9	+23	+18
8 h	+14	+14	+12	+12	+6	+12	+17	+10	+21	+12	+10	+25	+20
24 h (1 Tag)	+23	+22	+19	+19	+11	+19	+25	+16	+33	+19	+18	+35	+30
48 h (2 Tage)	+33	+31	+28	+27	+17	+27	+35	+23	+45	+26	+25	+45	+42
72 h (3 Tage)	+40	+38	+35	+33	+21	+33	+42	+28	+53	+32	+30	+51	+51
168 h (1 Woche)	+60	+57	+46	+47	+34	+47	+58	+40	+70	+46	+45	+67	+72
336 h (2 Wochen)	+79	+77	+57	+56	+45	+56	+69	+50	+81	+58	+59	+80	+92
672 h (4 Wochen)	+96	+97	+67	+64	+56	+64	+77	+58	+93	+70	+74	+92	+114
1344 h (8 Wochen)	+111	+114	+80	+76	+68	+75	+90	+68	+105	+83	+92	+108	+139
1608 h (10 Wochen)	+114	+117	+83	+79	+71	+77	+94	+71	+108	+86	+96	+113	+145

Tab. 16b Änderungen der Holzfeuchte in % bezogen auf Feuchte bei 20°C / 65% r.L. bei 10 Wochen Wasserlagerung als Funktion der Lagerdauer

	DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
Holzfeuchte in %											
Normalklima	14	16	13	14	12	11	10	12	8	12	11
2 h	+8	+9	+7	+24	+9	+22	+9	+25	+3	+45	+11
6 h	+11	+14	+10	+28	+14	+27	+12	+31	+5	+47	+15
8 h	+12	+16	+12	+30	+17	+30	+14	+34	+6	+47	+17
24 h (1 Tag)	+17	+29	+20	+35	+31	+37	+21	+41	+12	+50	+24
48 h (2 Tage)	+25	+43	+31	+41	+49	+45	+30	+48	+18	+56	+32
72 h (3 Tage)	+32	+53	+40	+47	+63	+51	+36	+53	+24	+61	+37
168 h (1 Woche)	+48	+80	+66	+61	+96	+66	+49	+66	+39	+73	+52
336 h (2 Wochen)	+60	+103	+93	+70	+125	+80	+61	+77	+54	+81	+66
672 h (4 Wochen)	+73	+124	+120	+78	+153	92	+72	+87	+69	+88	+81
1344 h (8 Wochen)	+87	+145	+145	+91	+180	+108	+85	+100	+85	+99	+95
1608 h (10 Wochen)	+91	+153	+151	+95	+186	+113	+88	+104	+89	+101	+98

4.8 pH-Wert

In den Tabellen 17 und 18 sind für die beiden Gruppen die jeweiligen pH-Werte dargestellt, wie sie nach den zwei unterschiedlichen Methoden ermittelt wurden.

Während die Werte nach Methode 1 zwar tendenziell abnehmen, aber keine wirklich deutliche Aussage zulassen, zeigen die Werte nach Methode 2 eine klare Abnahme des pH-Wertes bei stärkerer thermischer Behandlung. Eine Versauerung des Holzes tritt also auf, der Effekt tritt aber vor allem beim Sprung von Unbehandelt nach Stufe 2 auf. Die Differenzen im pH-Wert von Stufe 2 und Stufe 3 sind einiges kleiner.

Tab. 17. pH-Werte für die Gruppe 1 mit Ahorn, Buche, Esche und Fichte.

	Ah Stufe 2 ¹⁾	Ah Stufe 3 ¹⁾	Bu unb.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unb.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unb.	Fi Stufe 2
Methode 1	3.38	3.55	3.74	3.90	3.31	4.18	3.47	3.42	4.20	3.74	4.12	3.90	3.31
Methode 2	3.90	3.88	4.16	3.57	3.62	4.46	3.80	3.65	4.46	4.03	4.28	4.15	3.56

¹⁾ die Baustoffsammlung der Fakultät für Architektur der TU München gibt für Ahorn unbehandelt einen pH-Wert von 5.3 an

Tab. 18. pH-Werte für die Gruppe 2 mit Douglasie und Föhre, unterschieden nach Kern und Splint.

	Dou Kern 0	Dou Kern 2	Dou Kern 3	Dou Splint 0	Dou Splint 2	Dou Splint 3	Fö Kern 0	Fö Kern 2	Fö Kern 3	Fö Splint 0	Fö Splint 2
Methode 1	3.47	3.44	3.32	3.98	3.31	3.29	3.92	3.70	3.37	4.02	3.63
Methode 2	3.64	3.63	3.52	4.23	3.50	3.47	4.10	3.92	3.59	4.18	3.80

Methode 1: WIHS 176

Methode 2: nach Roffael und Kossatz (1981). pH – Wert und Pufferkapazität des Holzes. Untersuchungsbericht U682/81. Fraunhofer Institut für Holzforschung.

4.9 Extraktstoffe

Die Bestimmung der Extraktstoffe zeigt, dass bei der thermischen Behandlung der Anteil an löslichen Stoffen (mit Ethanol/Toluol) stark zunimmt. Ebenso steigt die totale Extraktmenge stark an (Ausnahme: Esche St.2). Beim Ligninanteil ist keine Tendenz erkennbar, während der Zellulosegehalt eher zunimmt und der Gehalt an Hemizellulose deutlich abnimmt. Siehe dazu Tabelle 19.

Tab. 19 Chemische Extraktion; Anteile und Ligningehalte der geprüften Hölzer

Holzart	Lösliche Anteile in Ethanol/ Toluol [%]	Extrakte Total [%]	Ligninanteil [%]	Anteil Zellulose [%]	Anteil Hemizellulose [%]
Ahorn St.2	10.3	17.0	23.6	59.4	8.3
Ahorn St.3	15.5	20.5	34.3	62.6	5.2
Buche	3.6	6.5	26.3	48.0	13.6
Buche St.2	8.5	15.8	25.7	52.5	10.4
Buche St.3	11.9	15.9	39.1	56.7	5.6
Buche Poll	2.4	5.1	25.9	48.6	13.9
Buche Poll St.2	9.6	18.3	22.8	54.7	13.9
Buche Poll St.3	13.7	19.0	34.4	62.2	5.9
Esche	6.5	18.9	22.0	55.7	9.4
Esche St.2	8.4	4.2	21.2	51.7	9.2
Esche St.3	13.5	18.1	38.2	54.9	8.0
Fichte	2.4	4.9	26.4	56.3	6.9
Fichte St.2	4.2	10.2	29.8	58.6	8.0
DK0	2.2	5.1	35.4	50.1	17.2
DK2	8.9	13.3	33.6	50.0	13.3
DK3	8.3	11.9	36.0	55.9	4.9
DS0	0.4	2.6	29.7	53.3	6.3
DS2	6.1	10.4	33.6	56.8	5.6
DS3	5.5	10.4	32.8	58.2	6.2
FK0	6.8	8.8	26.9	54.8	6.8
FK2	7.0	12.3	32.9	56.4	8.7
FK3	8.0	10.9	39.5	53.2	7.3
FS0	2.5	5.9	30.6	55.6	9.5
FS2	7.7	12.3	30.9	55.6	9.5

4.10 Farbe / Helligkeit

Der Kennwert L (der üblicherweise für die Beurteilung der Helligkeit dient) zeigt für die tangentialen als auch die radiale Fläche der jeweiligen Proben ähnlich grosse Werte auf. Mit zunehmender Behandlungstärke sinkt der L-Wert ab, was einer Verschiebung in die dunklere Farbregion (schwarz) entspricht. Dabei kommt es auch zu einem Farbangleich über die jeweilige Probe; vor allem auf der Tangentialfläche werden die Standardabweichungen deutlich kleiner (vergleiche hierzu vor allem Tab. 20 und 21).

Erste Auswertungen bezüglich des Zusammenhangs zwischen Farbe und Festigkeit des Holzes hatten bereits gezeigt, dass ein solcher nicht vorliegt. Auf eine weitere Auswertung wurde daher verzichtet (vgl. dazu auch Johansson und Morén 2005). Generell gilt aber der Trend, dass die Festigkeit mit zunehmender Behandlungsintensität sinkt. Da die Intensität mit der Farbe korreliert gilt allgemein, je dunkler das Holz ist, um so geringer ist die Festigkeit (Junghans und Niemz, 2005). Es gehen aber noch zahlreiche andere Faktoren in die Festigkeit ein.

Tab. 20. Farbkennwert L des Lab-Farbsystems für die Serie 1 (Ah, Bu, Es, Fi). L steht für den Farbverlauf weiss-schwarz (d.h. je kleiner L, desto dunkler ist die Farbe). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte und Standardabweichungen.

		Ah Stufe 2	Ah Stufe 3	Bu unb.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unb.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unb.	Fi Stufe 2
Helligkeit Radial (L-Wert)	0	49.4	41.5	72.0	47.9	35.9	40.3	18.5	11.2	48.0	20.5	10.9	61.2	29.3
	s	1.9	2.0	1.8	2.5	1.7	1.6	1.7	1.0	5.3	2.2	0.9	5.5	2.4
Helligkeit Tangential (L-Wert)	0	49.2	41.4	68.2	46.9	34.6	39.8	17.1	10.6	47.4	19.7	10.1	59.6	28.6
	s	1.6	2.4	13.7	3.0	1.7	1.5	1.5	0.8	4.7	2.2	0.8	6.6	2.6
Holzfeuchte [%]	0	6.2	5.5	10.9	9.1	8.7	10.9	7.8	5.8	10.3	8.1	5.9	11.6	9.3

Tab. 21. Farbkennwert L des Lab-Farbsystems für die Serie 2 (Douglasie, Föhre, Kern und Splint). L steht für den Farbverlauf weiss-schwarz (d.h. je kleiner L, desto dunkler ist die Farbe). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte und Standardabweichungen.

		DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
Helligkeit Radial (L-Wert)	0	72.9	57.8	47.5	79.1	56.5	47.8	79.8	56.4	47.2	82.0	56.9
	s	10.8	2.2	2.3	1.6	1.9	2.5	1.8	2.6	5.9	2.1	1.8
Helligkeit Tangential (L-Wert)	0	71.3	56.0	46.5	79.2	54.0	46.7	79.4	55.0	44.7	80.0	56.1
	s	10.6	2.6	5.6	1.9	2.2	3.3	2.3	2.9	7.8	11.5	1.9
Holzfeuchte [%]	0	13.4	7.5	6.8	13.8	9.9	6.3	11.9	9.7	7.2	13.6	8.9

Tab. 22. Farbkennwert a des Lab-Farbsystems für die Serie 1 (Ah, Bu, Es, Fi). a steht für den Farbverlauf rot-grün (d.h. je kleiner a, desto grüner ist die Farbe). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte und *Standardabweichungen*.

		Ah Stufe 2	Ah Stufe 3	Bu unb.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unb.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unb.	Fi Stufe 2
a-Wert Radial	0	8.3	6.6	5.4	8.1	4.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	s	0.4	0.7	0.8	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
a-Wert Tangential	0	8.3	6.2	5.5	7.8	4.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	s	0.5	0.8	1.4	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Holzfeuchte [%]	0	6.2	5.5	10.9	9.1	8.7	10.9	7.8	5.8	10.3	8.1	5.9	11.6	9.3

Tab. 23. Farbkennwert b des Lab-Farbsystems für die Serie 1 (Ah, Bu, Es, Fi). b steht für den Farbverlauf gelb-blau (d.h. je kleiner b, desto blauer ist die Farbe). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte und *Standardabweichungen*.

		Ah Stufe 2	Ah Stufe 3	Bu unb.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unb.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unb.	Fi Stufe 2
b-Wert Radial	0	23.1	17.7	25.2	20.6	11.9	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	s	1.1	2.2	0.6	1.4	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
b-Wert Tangential	0	23.2	17.7	24.0	19.6	11.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	s	1.2	2.0	4.8	1.6	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Holzfeuchte [%]	0	6.2	5.5	10.9	9.1	8.7	10.9	7.8	5.8	10.3	8.1	5.9	11.6	9.3

Tab. 24. Farbkennwert a des Lab-Farbsystems für die Serie 2 (Douglasie, Föhre, Kern und Splint). a steht für den Farbverlauf rot-grün (d.h. je kleiner a, desto grüner ist die Farbe). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte und *Standardabweichungen*.

		DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
a-Wert Radial	0	7.8	6.3	6.3	2.7	6.6	6.4	2.5	7.2	7.0	0.0	7.5
	s	1.8	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	1.2	0.6	1.1	1.5	0.7
a-Wert Tangential	0	8.7	6.4	6.5	2.3	6.7	6.7	2.8	7.4	7.1	0.2	7.6
	s	2.2	0.5	1.0	1.2	0.6	0.7	1.5	0.9	1.4	1.6	0.8
Holzfeuchte [%]	0	13.4	7.5	6.8	13.8	9.9	6.3	11.9	9.7	7.2	13.6	8.9

Tab. 25. Farbkennwert b des Lab-Farbsystems für die Serie 2 (Douglasie, Föhre, Kern und Splint). b steht für den Farbverlauf gelb-blau (d.h. je kleiner b, desto blauer ist die Farbe). Anzahl der Probekörper: siehe Gesamttabelle im Anhang. Mittelwerte und *Standardabweichungen*.

		DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
b-Wert Radial	0	27.6	26.9	23.4	26.7	27.3	23.2	28.2	29.9	24.3	26.6	30.9
	s	4.1	1.3	2.0	1.1	0.9	1.9	0.9	1.9	3.6	1.1	2.0
b-Wert Tangential	0	27.8	26.2	23.6	26.2	26.4	22.9	28.4	28.3	23.0	26.0	30.6
	s	4.2	1.4	3.5	1.7	1.2	2.8	1.2	2.7	4.4	4.1	2.0
Holzfeuchte [%]	0	13.4	7.5	6.8	13.8	9.9	6.3	11.9	9.7	7.2	13.6	8.9

4.11 Einfluss der Wärmebehandlung auf die Farbdifferenz bei rotkerniger Buche und braunkerniger Esche

Es wurden mit dem Lab-Farbsystem jeweils 10 Messungen pro Behandlungsart und verkernt / unverkernt vorgenommen.

Dabei zeigt sich klar, dass sich die Farbe von „verkernt“ und „unverkernt“ bei vorliegen einer thermischen Behandlung deutlich angleichen (siehe Abb. 27 und 29). Während die Stufe 2 sich noch in einem mittleren Braunton zeigt, ist die Stufe 3 doch schon im sehr dunklen Braun anzusiedeln. Bei den thermisch behandelten Proben kann dabei der Farbkern nicht mehr vom restlichen Holz unterschieden werden, eine Streifenbildung bei Buche (wie bei Oelhafen et al. 2006) trat nicht auf (siehe Abb. 28 und 30). Für die Messungen wurde angenommen, dass der Farbkern im Innern des Stammes lag, d.h. es wurde der Jahringaufbau betrachtet und die Stamminnenseite festzustellen.

Die Wärmehandlung könnte also für Esche mit Braunkern und Buche mit Rotkern verstärkt genutzt werden, da eine Farbegalisierung eintritt. Da diese Sortimente derzeit schwer absetzbar sind, würde hier eine deutliche Wertschöpfung erreicht und ein Absatzkanal erschlossen.

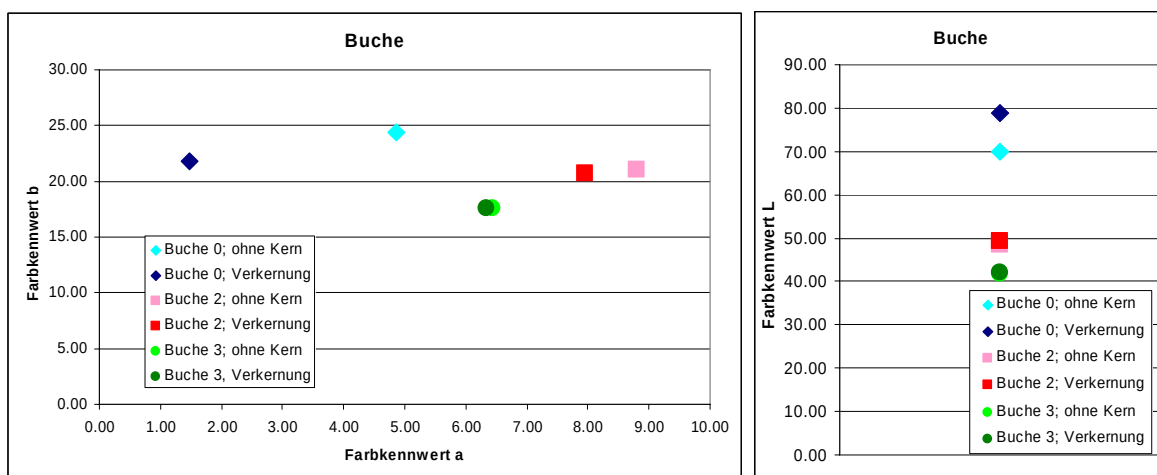


Abb. 27. Farbkennwerte (Mittelwerte von jeweils 10 Messungen) für die Buche bei entsprechenden Behandlungsstufen

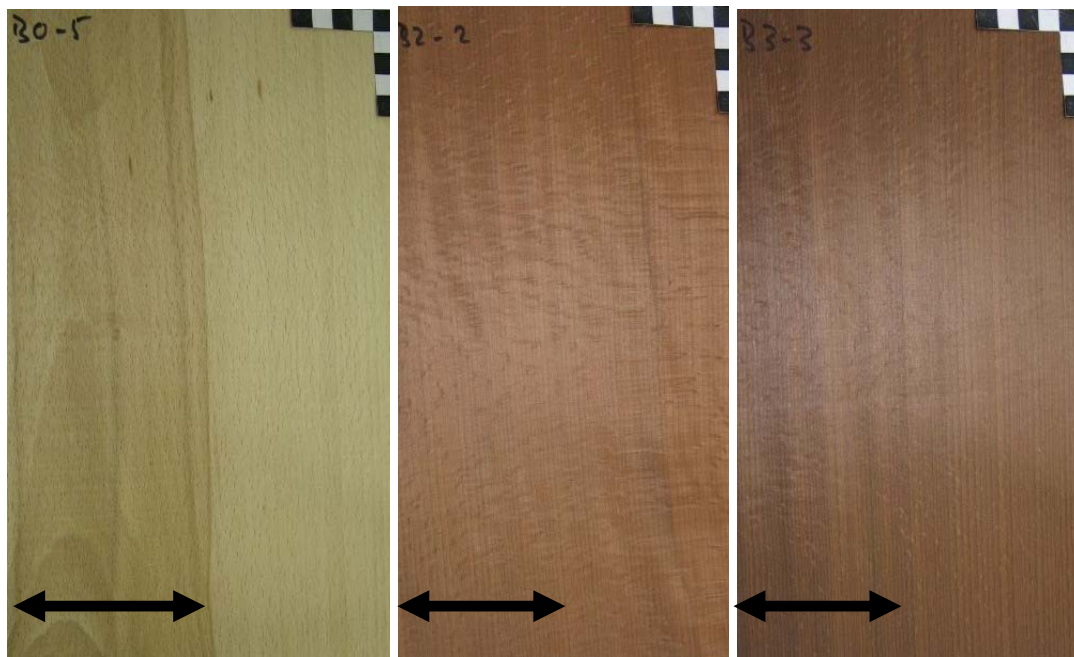


Abb. 28. Buche mit Rotkern (Bereich mit Pfeil): Links Unbehandelt; Mitte Stufe 2; Rechts Stufe 3

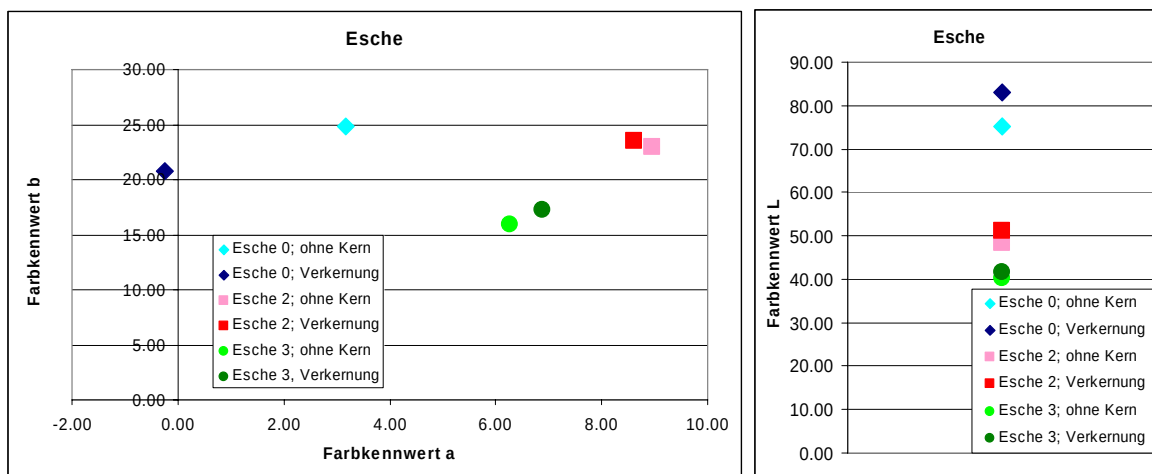


Abb. 29. Farbkennwerte (Mittelwerte von jeweils 10 Messungen) für die Esche bei entsprechenden Behandlungsstufen

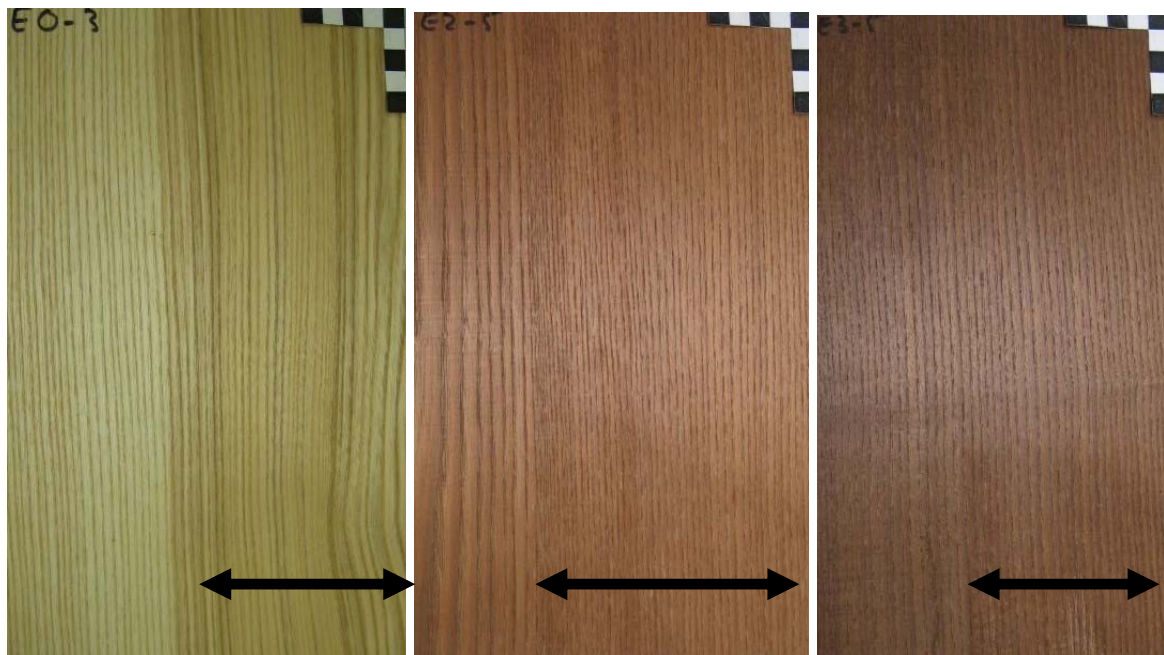


Abb. 30. Esche mit Braunkern (Bereich mit Pfeil): Links Unbehandelt; Mitte Stufe 2; Rechts Stufe 3

4.12 Wärmeleitfähigkeit

Die Platten wurden bei 10, 20 und 30°C und einer Temperaturdifferenz von jeweils 10K gemessen.

Tab. 26. Wärmeleitfähigkeiten der mit dem ‚lambda-Meter EP-500‘ untersuchten Plattenaufbauten (alles Fichte).

Nr.		Holz- feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]	λ 10°C [W/m·K]	λ 20°C [W/m·K]	λ 30°C [W/m·K]	Temp. Koeff. [W/m·K ²]
1	Wärmebehandelt Riftschnitt	8.1	378	0.079	0.081	0.082	0.00014
2	Wärmebehandelt variable Jahrringlagen	7.9	372	0.086	0.088	0.090	0.00019
3	Unbehandelt Riftschnitt	11.7	390	0.091	0.093	0.094	0.00018

Bei den drei untersuchten Proben ergeben sich bei den wärmebehandelten Proben leicht tiefere Werte (12% bzw. 5% für Riftschnitt bzw. variable Jahrringlagen) als bei der unbehandelten Probe. Dies dürfte auf die reduzierte Dichte und Feuchte zurückzuführen sein. Dabei kann eigentlich nur Probe 1 mit Probe 3 verglichen werden (d.h. ein um 12% tieferer Wert der wärmebehandelten Probe), da bei beiden Proben die Wärmeleitfähigkeit in tangentialer Richtung gemessen wurde. Die bei Probe 2 leicht höhere Wärmeleitfähigkeit gegenüber Probe 1 ist vermutlich auf die zum Teil radiale Ausrichtung zurückzuführen (bei Vollholz ist die Wärmeleitfähigkeit in radialer Richtung – je nach Holzart etwas unterschiedlich – bis ca. 10% höher als in tangentialer Richtung).

Untersucht wurden ausserdem Holzplatten aus Buche und Esche, welche in den Varianten unbehandelt, Stufe 2 und Stufe 3 vorlagen. Dabei zeigt sich eine deutliche Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit durch die gewählte thermische Behandlung. Bei der Buche fiel der Unterschied im Mittel mit ca. 10% ähnlich aus wie für die Fichte in Tab. 26. Für die Esche wurden aber wesentlich grössere Werte erzielt.

Tab. 27. Wärmeleitfähigkeiten λ [W/mK] der mit dem ‚Kemtherm QTM-D3‘ untersuchten Buche und Esche

Holzart	Dichte [kg/m ³]	Mittelwert [W/mK]	Abweichung zu unbehandeltem Vergleichswert [%]
Buche unb.	703	0.1633	X
Buche St.2	655	0.1552	-5
Buche St.3	623	0.1358	-17
Esche unb.	689	0.1462	X
Esche St.2	663	0.045	-69
Esche St.3	591	0.0277	-81

5 Diskussion

5.1 Festigkeiten

Der E-Modul reduziert sich durch die Wärmebehandlung leicht, die Festigkeit sehr deutlich bis zu 60%. Mit zunehmender Behandlungsintensität sinkt die Festigkeit. Auch die Bruchdehnung sinkt. Die Festigkeitsreduzierung ist gravierend und bei statisch belasteten Elementen unbedingt zu berücksichtigen. Eine Abhängigkeit von der Behandlungsstufe (= Behandlungsstärke) und der vorliegenden Holzdichte ist gegeben. Die Abnahme der Werte für die Biegefestigkeit und den Biege-E-Modul betragen für die Stufe 2 zwischen 20 und 40%, für die Stufe 3 in etwa zwischen 20 und 60%. Die Variationskoeffizienten sind bei allen Messungen (auch bei den unbehandelten Proben) relativ gross.

5.2 Härte

Die Härte (auf tangentialer und radialer Fläche) nimmt mit steigender Behandlungsstärke ab. Die Härtereduzierung ist ähnlich markant wie die der Biegefestigkeit. Die Abnahme beträgt für die Laubhölzer bei Stufe 2 15 – 35 %, für die Stufe 3 30 – 60%; für die Nadelhölzer liegt die Abnahme der Härte für die Stufe 2 und 3 im Bereich von 10 – 50%. Die Variationskoeffizienten sind bei einigen Gruppen von Proben relativ gross.

5.3 Quellung / Sorption

Die Quellung in radialer und tangentialer Richtung wird durch die thermische Behandlung um bis zu 50% vermindert. Die Holzfeuchtigkeit nimmt dagegen nur um ca. 40% ab.

Das Verhältnis von radialer zu tangentialer Quellung welches bei unbehandeltem Holz ca. 1 : 2 beträgt, gilt unverändert für das thermisch behandelten Holz, der Anisotropieeffekt bleibt also erhalten.

5.4 Wasserlagerung

Die Quellung bei Wasserlagerung wird in radialer und tangentialer Richtung bei Thermoholz um rund 50% deutlich vermindert. Tangential ist der Effekt stärker ausgeprägt als Radial. Der Anisotropieeffekt bleibt also auch nach der thermischen Behandlung erhalten.

Die Holzfeuchtigkeit und die Wasseraufnahme hängen ebenfalls stark von der Behandlung ab, wobei hier nach 10 Wochen immer noch ein Anstieg der Messwerte zu verzeichnen war. Die Holzfeuchte nach Wasserlagerung ist bei den behandelten Proben zum Teil höher als bei den unbehandelten.

Diese Diskrepanz zwischen erhöhter Wasseraufnahme und trotzdem verminderter Quellung dürfte daher rühren, dass sich das Wasser beim wärmebehandelten Holz eher in den Makroporen einlagert, wo es zwar zu einer vermeintlichen Massezunahme, aber nicht zu einer gesteigerten Quellung führt. Zudem tritt ja durch die thermische Behandlung einerseits eine Verschiebung der Porenanteile von kleinen zu grossen Poren auf (Junghans, 2003) und andererseits wird das Holzgefüge an und für sich stark belastet (→ Risse, etc.) was den Wassereintritt begünstigt. Zudem nimmt der Gehalt an Hemizellulosen deutlich ab, ein stark quellbarer Zellbestandteil.

5.5 pH-Wert und Extraktstoffe

Der pH-Wert nimmt mit steigender Behandlungsstärke ab. Bei der Douglasie und der Föhre ist beim Kernholz bereits bei der Stufe 2 ein grosser Abfall zu verzeichnen, während beim Splintholz der pH-Abfall erst bei der Stufe 3 auftritt.

Der Anteil an löslichen Stoffen nimmt durch die Behandlung stark zu. Dies zeigt, dass es bei der thermischen Behandlung zu starken chemischen Änderungen im Holzaufbau kommt und das Holz dementsprechend stark beansprucht wird. Ebenso steigt der Zellulosegehalt während der Gehalt an Hemizellulose deutlich abnimmt. Es treten also grosse Veränderungen im chemischen Aufbau des Holzes ein.

5.6 Farbe

Die allgemeine Grundtendenz ist jene, dass das Holz mit zunehmender Intensität der Behandlung dunkler wird. Dabei wird die Farbgebung vereinheitlicht. Die Standardabweichungen der einzelnen Farbkennwerte nehmen durch die therm. Behandlung ab, das Farbbild des Holzes wird also einheitlicher. Die Farbe wird aber ebenfalls durch Holzinhaltsstoffe als auch den jeweiligen Wuchsbedingungen beeinflusst und kann demnach vorgängig nicht klar bestimmt werden.

Farbkerne der Buche und Esche können nach einer thermischen Behandlung nicht mehr vom unbehandelten Holz unterschieden werden. Dies führt zu einer erhöhten Wertschöpfung dieser Holzarten. Die Ergebnisse von Oelhafen (2005) im Labormassstab lassen sich also auch auf industrieller Ebene anwenden. Die bei Oelhafen (2005) bei Behandlung in Sauerstoffatmosphäre ermittelte Streifenbildung bei rotkerniger Buche wurde nicht festgestellt

5.7 Wärmeleitfähigkeit

Diese nimmt aufgrund der thermischen Behandlung ab. Die Ursache dafür dürfte in der Reduzierung der Dichte und der Holzfeuchte zu suchen sein. Beide Kenngrößen bewirken eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit wird durch die Wärmeleitung um etwa 10% vermindert.

6 Fazit

In Tabelle 28 sind die Auswirkungen der thermischen Behandlung auf eine Vielzahl von Kennwerten zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass die allermeisten Werte bei steigender Behandlungsstärke grundsätzlich abnehmen. Teilweise sind jedoch auch Zunahmen zu verzeichnen, welche aber mit weiteren Untersuchungen und grösserem Stichprobenumfang zu überprüfen wären.

Zwischen den Laub- und den Nadelhölzern sind keine wesentlichen Unterschiede festzustellen; zwischen dem Splint- und Kernholz der Douglasie und Föhre jedoch sind je nach untersuchtem Kennwert unterschiedlich ausgeprägte Tendenzen erkennbar. Durch die Angleichung des Splintes zum Kern bei Douglasie und Föhre sowie die Verkernung bei Buchen und Eschenholz in Bezug auf Farbe und Dauerhaftigkeit kann zumindest bei diesen Hölzern die Wertschöpfung wesentlich erhöht werden. In jeden Fall bleiben die Strukturen des Holzes weitgehend erhalten, können aber je nach Standort des Baumes im Wald und der Provenienz unterschiedlich sein.

Die Untersuchungen unterstützen die Erkenntnisse, dass thermisch behandeltes Holz nicht mehr für statisch belastete Bauteile verwendet werden kann; Festigkeiten und E-Moduli nehmen stark ab. Andere Eigenschaften, wie Farbgebung, Dauerhaftigkeit oder Wärmeleitfähigkeit hingegen werden verbessert.

Wird das Produkt „thermisch behandeltes Holz“ also in geeigneter Art und Weise eingesetzt, können seine positiven Eigenschaften bestens genutzt werden.

In der Aufgabenstellung für das Projekt „Industrielle Untersuchungen zur Optimierung der Eigenschaften von thermisch vergütetem Holz, insbesondere Laubholz“ (Wald&Holz Projekt Nr. 2005.07) waren ursprünglich folgende zwei Punkte vorgesehen:

- 1) Optimierung der Technologie für ausgewählte Vergütungsstufen
- 2) Prüfung der Eigenschaften des vergüteten Materials

Es hat sich nun aber gezeigt, dass aufgrund der aufwendigen Untersuchungen und der zum Teil nicht ganz klaren Ergebnisse lediglich der Punkt 2 (Materialkennwerte) umfangreich erarbeitet werden konnte.

Die vorliegenden Probekörper wurden mittels Standardparametern hergestellt, eine Variation der möglichen regelbaren Parameter der Behandlung (Druck, Temperatur, Behandlungsdauer, N₂-Anteil am Umgebungsmedium) hätte einen enormen Mehraufwand an Probekörpern und Zeit mit sich gebracht und aufgrund der zum Teil nicht eindeutigen Trends für Verwirrung gesorgt. Bei künftigen Untersuchungen sollte der Stichprobenumfang erhöht werden, um die Trends noch besser und klarer herauslesen zu können.

Die vorliegende Untersuchung kann also nicht abschliessend zu einer optimierten Prozessführung der thermischen Behandlung führen, sondern kann als Basis für allfällige weitere Untersuchungen dienen in denen die Feineinstellungen des Prozesses genauer ermittelt werden können.

Es sollten weitere Versuche, möglichst unter gezielter Optimierung der Sortimente durchgeführt werden. Dabei sind folgende Fragen zu klären:

- Einfluss von Temperatur, Druck, Holzfeuchte vor der Behandlung, Variabilität des Materials für verschiedene Holzarten
- Erforderliche Nachbehandlung des Materials

Mittelfristig sind auch Fragen der Verarbeitung zu untersuchen. Erste Arbeiten dazu laufen an der ETH (Verklebung, Rissbildung und Formbeständigkeit verklebter Elemente).

Tab. 28. Prozentuale Änderung der Mittelwerte der behandelten Proben bezogen auf Werte von unbehandelten Proben.

Werte-Entwicklung prozentual zu unbehandelten Proben	Ah unb.	Ah Stufe 2	Ah Stufe 3	Bu unb.	Bu Stufe 2	Bu Stufe 3	Bu Poll. unb.	Bu Poll. Stufe 2	Bu Poll. Stufe 3	Es unb.	Es Stufe 2	Es Stufe 3	Fi unb.	Fi Stufe 2	DK0	DK2	DK3	DS0	DS2	DS3	FK0	FK2	FK3	FS0	FS2
Holzdichte (Normalklima) 1)	2)	-11%	-10%		-6%	-11%		-8%	-1%		+ 4%	-11%		+4%		-1%	-4%		-16%	-10%		-2%	-7%		-7%
Biege-E-Modul	2)	+28%	+7%		-16%	-11%		-3%	-7%		+26%	+9%		+8%		+8%	+8%		-29%	-7%		+3%	+3%		-4%
Biegefestigkeit	2)	+0%	-51%		-42%	-59%		-27%	-61%		-1%	+55%		-30%		-3%	-10%		-37%	-17%		-22%	-35%		-34%
Arbeit bis Bruch		6)	6)		-83%	-93%		-66%	-94%		-48%	-91%		-69%		-66%	-70%		-61%	-33%		-27%	-42%		-80%
max. Dehnung		6)	6)		-62%	-75%		-44%	-73%		-46%	-74%		-49%		-43%	-54%		-27%	-24%		+1%	-20%		-50%
E-Modul Eigenfrequenz	5)	+8%	-5%		-16%	-4%		-4%	-4%		+29%	+2%		+9%		+10%	+10%		-28%	-8%		+3%	+1%		-5%
E-Modul Ultraschall		6)	6)		-17%	-12%		-2%	-3%		+29%	+10%		+8%		+9%	+10%		-25%	-6%		+4%	+0%		-5%
Ultraschallgeschwindigkeit	5)	+10%	+3%		-6%	-1%		+4%	+27%		+11%	+11%		+ 2%		+5%	+7%		-6%	+2%		+3%	+4%		+1%
Brinell Druck radial	2)	+17%	-4%		-18%	-52%		-26%	-13%		-9%	-35%		-9%		-22%	-37%		-49%	-21%		+6%	-13%		-11%
Brinell Druck tangential	2)	-14%	-32%		-25%	-58%		-35%	-30%		+11%	-40%		-9%		-42%	-42%		-48%	-25%		-1%	-15%		-25%
Holzfeuchte (Normalklima) 1)	3)	-44%	-50%		-26%	-30%		-32%	-48%		-30%	-50%		-17%		-44%	-49%		-28%	-54%		-18%	-39%		-35%
Farbe L* tangential		6)	6)		-31%	-49%		-57%	-73%		-58%	-79%		-52%		-21%	-35%		-32%	-41%		-31%	-44%		-30%
Farbe a* tangential		6)	6)		+42%	-20%		0%	0%		0%	0%		0%		-26%	-25%		+191%	+191%		+162%	+154%		+3700%
Farbe b* tangential		6)	6)		-18%	-54%		0%	0%		0%	0%		0%		-6%	-15%		+1%	-13%		0%	-19%		+18%
pH-Wert (Methode 2)	4)	-26%	-27%		-14%	-13%		-15%	-18%		-10%	-4%		-14%		- 0%	-3%		-17%	-18%		-4%	-12%		-9%

1) Normalklima: 20°C und 65% relative Luftfeuchte

2) Vergleichswerte für Ahorn unbehandelt stammen aus der Holzdatenbank der TU Dresden

3) Vergleichswerte für Ahorn unbehandelt stammen aus der Datenbank, resp. aus eigenen Messungen der ETH Zürich

4) Vergleichswerte für Ahorn unbehandelt stammen aus der Baustoffsammlung der Fakultät für Architektur der TU München

5) Vergleichswerte für Ahorn unbehandelt stammen aus Bucur, V. (1995): Acoustics of wood; resp. wurden aufgrund dieser Werte errechnet

6) Aufgrund von fehlenden Vergleichswerten für unbehandelten Ahorn werden keine Prozentwerte für die Änderung angegeben

Literatur

- Bächle, F. (2004):** Weathering resistance of oil-heat-treated timber. ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Gruppe Holzphysik, Int. Bericht Nr. 19.
- Baustoffsammlung der Fakultät für Architektur der TU München:**
<http://wdb.ebb1.arch.tu-muenchen.de/holz.php>; Stand: 28.9.2006
- Bucur, V. (1995):** Accoustics of wood. 284 S.
- Burmester, A. (1970):** Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit. Grundlagen und Vergütungsverfahren. BAM-Bericht Nr. 4. Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin.
- Buro, A. (1954):** Die Wirkung von Hitzebehandlung auf die Pilzresistenz von Kiefern- und Buchenholz. Holz als Roh- und Werkstoff, 12, S. 297-304.
- Giebler, E. (1981):** Dimensionsstabilisierung von Holz durch Feuchte/Wärme/ Druck-Behandlung. Holz als Roh- und Werkstoff, 418(1981) S.87-94
- Gonet, B. (1973):** Der Einfluss des Dämpfens auf die Eigenschaften von Rotbuchenholz. Holztechnologie, 14, S. 70-72.
- Holzdatenbank der TU Dresden:** <http://www.holzdatenbank.de/> ; Stand: 28.9.2006
- Johansson, D.; Morén, T. (2005):** The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. Holz als Roh- und Werkstoff, 2, S. 104 – 110.
- Junghans, K. (2003):** Untersuchungen zu spezifischen Eigenschaftsänderungen bei der thermischen Vergütung von Fichtenholz. Diplomarbeit an der BA Sachsen, durchgeführt an der ETH Zürich, Professur Holzwissenschaften.
- Junghans, K.; Niemz, P. (2005):** Thermoholz – Erfahrungen mit und Meinungen zu dem Material. Holztechnologie 46(4):31-35.
- Kamdem, D.P.; Pizzi, A.; Guyonnet, R.; Jermannaud, A. (1999):** Durability of heat-treated wood. IRG/WP 99-40145
- Kamdem, D. P.; Pizzi, A.; Jermannaud, A. (2002):** Durability of heat-treated wood. Holz als Roh und Werkstoff, 60, S. 1-6.
- Kamdem, D. P.; Pizzi, A.; Triboulot, M. C. (2000):** Heat-treated timber: potentially toxic byproducts presence and extent of wood cell wall degradation. Holz als Roh und Werkstoff, 58, S. 253-257.
- Kollmann, F. (1955):** Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, zweite Auflage, zweiter Band.
- Kollmann, F.; Keylwerth, R.; Kübler, H. (1951):** Verfärbungen des Vollholzes und der Furniere bei der künstlichen Holztrocknung. Holz als Roh und Werkstoff, 10, S 382-391.
- Kollmann, F.; Schneider, A. (1964):** Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich bis 200° C auf wichtige physikalische und physikalisch-chemische Eigenschaften des Holzes.
- Kubinsky, E. (1971):** Der Einfluss des Dämpfens auf die Holzeigenschaften. Holzforschung und Holzverwertung, 23.
- Leithoff, H.; Peek, R.D. (2001):** Heat treatment of bamboo. IRG/WP 01-40216
- Militz, H. (2002):** Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art. In: Proceedings of Conference on "Enhancing the

- durability of lumber and engineered wood products" February 11-13, 2002, Kissimmee, Orlando. Forest Products Society, Madison, US.
- Militz, H.; Hill, C. (2005):** Wood modification: Processes, Properties and Commercialisation. The second european conference on wood modification ECWM 2005. 6th/7th october 2005, Göttingen, Germany.
- Molnár, S.; Tolvaj, L.; Németh, R. (2006):** Holzqualität und Homogenisierung der Farbe von Zerreiche (*Quercus cerris* L.) mittels Dämpfprozess. Holztechnologie, 47, S. 20-23.
- Oelhafen, M. (2005):** Untersuchung der Eignung der thermischen Behandlung als Methode zur Farbegalierung von Holz mit fakultativem Farbkern. Diplomarbeit an der HSB Biel, durchgeführt an der ETH Zürich, Inst. für Baustoffe - Holzphysik.
- Oelhafen, M.; Niemz, P.; Hurst, A. (2006):** Untersuchungen zur thermischen Vergütung von Esche und Rotbuche mit dem Ziel der Farbänderung. Teil 2: Optische Eigenschaften. Holztechnologie, 47(2006)3, S. 20-24.
- Polyak, A. (1948):** Holzaufschluss mit Peressigsäure. Angewandte Chemie, 60:2, S. 45-46.
- Popper, R.; Niemz, P.; Eberle, G. (2005):** Untersuchungen zum Sorptions- und Quellungsverhalten von thermisch behandeltem Holz. Holz als Roh und Werkstoff, 63, S. 135-148
- Rapp, A.O. (2001):** Review on heat treatments of wood. COST ACTION E22 Environmental optimisation of wood protection. Proceedings of Special Seminar held in Antibes, France on 9 February 2001.
- Riehl, T.; Welling, J.; Frühwald, A. (2002):** Druckdämpfen von Schnittholz. Arbeitsbericht des Instituts für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes, Nr. 2002 / 01, September 2002. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg
- Sailer, M., Rapp, A.O., Leithoff, H. (2000a):** Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment. IRG/WP 00-40162
- Sailer, M.; Rapp, A. O.; Leithoff, H.; Peek, R.-D. (2000b):** Vergütung von Holz durch Anwendung einer Öl-Hitzebehandlung. Holz als Roh- und Werkstoff 58, S. 15-22
- Stamm, A.J.; Hansen, I.A. (1937):** Minimizing wood shrinkage and swelling: Effect of heating in various gases. Ind. Eng. Chem. 29(1937), S. 831-833
- Stamm, A. J. (1964):** Wood and cellulose science.
- Teischinger, A.; Stingl, R. (2002):** Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte, Lignovisionen Band 3. Institut für Holzforschung und VHÖ, Universität für Bodenkultur Wien.
- Tiemann, H. D. (1947):** Wood Technology, constitution, properties and uses.
- Tjerdsmas, B.F.; Stevens, M.; Militz, H. (2000):** Durability aspects of (hydro)thermal treated wood. IRG/WP 00-40160

Anhang A1 - Datentabelle

Im Anhang A1 befindet sich die komplette Tabelle mit den ermittelten Kenndaten für die erfolgten Messungen an den Biegestäben (Mittelwerte und Standardabweichungen).

Holzart		Rohdichte [g/cm ³]	Helligkeit Radial (L-Wert)	Helligkeit Tangential (L-Wert)	Biege- festigkeit [N/mm ²]	Dehnung bei Fmax [%]	Arbeit bis maximale Spannung [Nmm]	Bruch- arbeit [Nmm]	Biege-E-Modul Zwick [N/mm ²]	Dynamischer E-Modul aus Schall- geschwindig- keit [N/mm ²]	E-Modul Eigen- schwingung [N/mm ²]	Holzfeuchte [%] für Farbe, Biegung, Schall	Brinell-Härte HbE [N/mm ²] Druckrichtung tangential	Brinell-Härte HbE [N/mm ²] Druckrichtung radial	Holzfeuchte [%] für Brinell
Ahorn Stufe II	Anzahl Proben	35	34	34	35	35	35	35	35	34	34	2	35	35	5
	Mittelwert	0.561	49.4	49.2	95.3	0.9	7995.5	8211.4	12009.4	14893.5	12642.2	6.4	22.4	30.4	6.2
	Standardabweichung	0.011	1.9	1.6	15.2	0.15	2599.2	2588.3	799.8	657.9	1151.5		1.5	2.2	0.0
Ahorn Stufe III	Anzahl Proben	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	2	35	35	5
	Mittelwert	0.564	41.5	41.4	46.7	0.45	1985.9	1804.1	10059.2	13085.7	11293.8	5.7	17.5	25.1	5.5
	Standardabweichung	0.024	2.0	2.4	21.0	0.16	1645.3	1971.7	2960.1	1366.5	1583.8		1.4	2.5	0.2
Buche unbehandelt	Anzahl Proben	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	2	35	35	5
	Mittelwert	0.738	72.0	68.2	132.8	2.07	31277.5	41137.1	13139.8	17077.4	14032.5	11.8	39.3	42.4	10.9
	Standardabweichung	0.018	1.8	13.7	5.6	0.17	3431.4	7105.7	741.8	1116.5	763.9		2.8	3.5	0.5
Buche Stufe II	Anzahl Proben	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	2	35	35	5
	Mittelwert	0.692	47.9	46.9	76.7	0.78	5714.8	7086.8	11092.2	14228.6	11765.2	8.7	29.5	34.6	9.1
	Standardabweichung	0.03	2.5	3.0	21.8	0.19	3341.1	5677.2	1784.4	1980.0	2023.8		2.0	3.7	0.3
Buche Stufe III	Anzahl Proben	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	2	35	35	5
	Mittelwert	0.656	35.9	34.6	53.8	0.51	2506.1	2760.6	11775.5	14982.5	13521.4	8.3	16.6	20.5	8.7
	Standardabweichung	0.031	1.7	1.7	13.2	0.16	1394.3	1973.8	1275.5	1568.6	1803.8		1.3	1.3	0.1
Buche Pollmeier unbehandelt	Anzahl Proben	27	27	27	27	27	27	27	27	26	26	2	35	35	5
	Mittelwert	0.685	40.3	39.8	138.1	1.62	24469.8	31971.9	13957.2	16943.3	15137.1	10.5	35.5	36.5	10.9
	Standardabweichung	0.023	1.6	1.5	8.3	0.09	3189.1	7536.1	1059.7	1178.2	1336.9		1.2	1.7	0.1
Buche Pollmeier Stufe II	Anzahl Proben	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	2	35	35	5
	Mittelwert	0.629	18.5	17.1	101.1	0.9	8786.4	10873.5	13595.7	16889.0	14539.6	7.1	23.1	26.9	7.8
	Standardabweichung	0.021	1.7	1.5	15.6	0.16	3075.9	4421.1	730.3	693.9	1118.2		2.2	2.8	0.1
Buche Pollmeier Stufe III	Anzahl Proben	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	2	35	35	5
	Mittelwert	0.676	11.2	10.6	54.5	0.43	1973.1	1974.6	12994.7	16351.4	14536.2	5.5	24.8	31.7	5.8
	Standardabweichung	0.014	1.0	0.8	8.2	0.07	607.8	607.5	665.5	948.8	1438.5		2.2	3.5	0.3
Esche unbehandelt	Anzahl Proben	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	2	35	35	5
	Mittelwert	0.633	48.0	47.4	97.6	1.68	17355.9	17367.9	9502.5	11713.0	10366.5	10.6	33.2	36.9	10.3
	Standardabweichung	0.028	5.3	4.7	9.6	0.19	4019.2	4030.1	858.8	1085.8	1461.4		2.6	9.7	0.1

Esche Stufe II	Anzahl Proben	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	2	35	35	5
	Mittelwert	0.659	20.5	19.7	96.5	0.9	7984.3	8984.5	12002.4	15100.1	13408.2	7.4	36.7	33.4	8.1
	Standardabweichung	0.032	2.2	2.2	19.2	0.18	3101.4	3942.5	1372.5	1214.4	1857.2		3.6	6.3	0.2
Esche Stufe III	Anzahl Proben	48	48	47	48	48	48	48	48	48	48	2	35	35	5
	Mittelwert	0.56	10.9	10.1	44.0	0.44	1626.9	1558.7	10312.6	12894.9	10576.0	5.3	20.0	24.1	5.9
	Standardabweichung	0.047	0.9	0.8	9.9	0.08	611.3	745.9	1249.2	1669.5	1376.8		2.6	6.2	0.5
Fichte unbehandelt	Anzahl Proben	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	2	35	35	5
	Mittelwert	0.462	61.2	59.6	90.6	1.26	12822.1	17693.8	12203.6	15300.8	13962.1	11.3	19.5	15.8	11.6
	Standardabweichung	0.049	5.5	6.6	16.1	0.22	4070.7	7297.7	2156.2	2737.8	2767.1		4.1	3.0	0.4
Fichte Stufe II	Anzahl Proben	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	2	35	35	5
	Mittelwert	0.481	29.3	28.6	63.7	0.64	4215.9	5473.1	13123.3	16465.5	14915.7	9.4	17.6	14.3	9.3
	Standardabweichung	0.08	2.4	2.6	15.3	0.29	3133.0	4828.5	2451.7	3441.3	3268.1		3.0	5.7	0.4
Föhre Splint unbehandelt	Anzahl Proben	55	55	55	52	2	52	52	52	55	55	5	25	25	4
	Mittelwert	0.588	82.0	80.0	94.3	1.31	13788.5	16136.6	13051.7	17942.4	14429.6	13.6	18.3	22.0	13.0
	Standardabweichung	0.037	2.1	11.5	11.3	0.2	3802.8	4270.8	1614.6	2110.8	1791.5		3.2	2.4	
Föhre Splint Stufe II	Anzahl Proben	44	44	44	40	40	40	40	40	44	44	7	25	25	4
	Mittelwert	0.546	56.9	56.1	61.9	0.65	4291.2	3231.7	12524.9	17013.9	13640.1	8.9	13.7	19.6	9.4
	Standardabweichung	0.046	1.8	1.9	16.8	0.3	3230.48	2583.85	2382.6	3039.1	2622.5		2.9	4.5	
Föhre Kern unbehandelt	Anzahl Proben	39	39	39	34	34	34	34	34	39	39	6	25	25	2
	Mittelwert	0.552	79.77	79.38	87.4	1.28	12372.1	12865.0	12137.5	16483.5	13360.7	11.9	16.6	19.8	12.6
	Standardabweichung	0.052	1.76	2.34	11.9	0.17	3118.5	4042.5	2204.5	2495.8	2425.8		2.6	3.3	
Föhre Kern Stufe II	Anzahl Proben	30	30	30	27	27	27	27	27	30	30	5	26	24	4
	Mittelwert	0.543	56.4	55.0	68.0	0.73	5175.0	4362.1	12513.8	17144.2	13709.7	9.7	16.4	21.0	9.4
	Standardabweichung	0.044	2.6	2.9	20.0	0.27	3376.1	3408.5	2528.8	3220.3	2814.9		6.3	2.9	
Föhre Kern Stufe III	Anzahl Proben	81	81	81	78	78	78	78	78	81	81	5	26	25	4
	Mittelwert	0.516	47.2	44.7	57.2	0.59	3874.6	3868.3	12540.1	16579.4	13558.6	7.2	14.1	17.2	6.9
	Standardabweichung	0.039	5.9	7.8	22.4	0.29	3377.6	3312.3	1820.0	2231.7	2034.4		2.2	1.4	
Douglasie Splint unbehandelt	Anzahl Proben	40	40	40	37	37	37	37	37	40	40	5	26	26	4
	Mittelwert	0.526	79.1	79.2	90.5	1.16	11902.5	14691.3	13961.7	18648.5	15252.3	13.8	21.3	25.4	13.0
	Standardabweichung	0.037	1.6	1.9	9.6	0.13	2700.5	5119.1	1696.8	2429.7	2056.9		6.9	4.0	

Douglasie Splint Stufe II	Anzahl Proben	20	20	20	17	17	17	17	17	20	20	5	24	23	2
	Mittelwert	0.443	56.5	54.0	56.9	0.85	5217.0	5677.8	9887.9	13869.5	10960.5	9.9	11.0	12.9	9.1
	Standardabweichung	0.033	1.9	2.2	11.2	0.17	2173.0	2290.7	1765.5	2257.0	1999.2		2.6	2.6	
Douglasie Splint Stufe III	Anzahl Proben	45	45	45	42	42	42	42	42	45	45	5	24	25	1
	Mittelwert	0.475	47.8	46.7	74.7	0.88	7276.7	9857.2	12971.1	17483.8	14037.6	6.3	15.9	20.0	7.4
	Standardabweichung	0.032	2.5	3.3	13.2	0.22	3244.6	4779.4	1429.6	1893.7	1672.2		5.1	2.8	
Douglasie Kern unbehandelt	Anzahl Proben	52	52	52	49	49	49	49	49	52	52	5	26	22	4
	Mittelwert	0.484	72.9	71.3	75.6	0.99	8031.7	9290.1	11304.9	15342.6	12246.2	13.4	20.3	22.1	12.9
	Standardabweichung	0.045	10.8	10.6	13.6	0.18	2750.7	3317.1	1593.3	2320.8	1737.3		6.0	10.6	
Douglasie Kern Stufe II	Anzahl Proben	20	20	20	17	17	17	17	17	20	20	5	26	24	4
	Mittelwert	0.477	57.8	56.0	73.1	1	8073.2	6736.0	12181.0	16773.2	13458.6	7.5	11.8	17.3	9.7
	Standardabweichung	0.034	2.2	2.6	8.2	0.11	1814.1	889.6	1170.9	1815.3	1531.3		2.2	1.9	
Douglasie Kern Stufe III	Anzahl Proben	96	96	96	93	93	93	93	93	96	96	5	25	25	4
	Mittelwert	0.466	47.5	46.5	67.5	0.79	5626.5	5395.4	12165.6	16843.1	13558.9	6.8	11.7	13.8	7.2
	Standardabweichung	0.045	2.3	5.6	11.3	0.2	2339.2	2637.0	1924.8	2575.8	2236.8		3.5	2.4	

Anhang A2 – Datenblatt allgemein

Thermische Behandlung von Holz



Anlage der Firma Balz Holz AG zur thermischen Behandlung

Die thermische Behandlung von Holz ist eine unter vielen Arten der Holzmodifikation, sie ist aber nicht mit dem Dämpfen gleichzusetzen. Das allgemeine Ziel der Holzmodifikation ist dabei eine dauerhafte biozidfreie Veränderung des Holzes zu erreichen. Dies mit dem Resultat gezielt Schwachpunkte des Holzes zu verbessern. Durch die Wärmebehandlung können folgende Punkte verbessert werden:

- Dauerhaftigkeit
- Quellen und Schwinden
- Farbe und Farbunterschiede

Das Endprodukt „thermisch behandeltes Holz“ weist dabei folgende Eigenschaften auf:

Bearbeitbarkeit	normal, es entsteht lediglich ein erhöhter Anteil an Feinstaub. Die Verwendung von Hartmetall-Schneiden mit sehr guter Schärfe wird empfohlen. Die höhere Sprödigkeit des Materials bedingt ein Vorbohren von Schrauben und allgemein einen sorgsameren Umgang mit dem Material.
Beschichtung	es sollten geeignete, spezifische empfohlene Beschichtungsmittel verwendet werden.
Einsatzbereich (Bsp.)	Innen: Parkett, Möbel, allgemeiner Innenausbau Aussen: Fassaden, Fenster, Verandaböden Das Holz kann aber nicht für einen statisch belasteten Einsatz verwendet werden. Ebenfalls wird von einem Einsatz im Erdkontakt abgeraten.
Farbe	die Farbgebung ist nicht UV-Beständig.
Geruch	direkt nach der Behandlung liegt ein typischer leicht stechender Geruch vor. Dieser verfliegt jedoch bald. Bei Laubholz ist dies ausgeprägter als bei Nadelhölzern.
Verbindungsmittel	aufgrund des tieferen pH-Wertes sind Verbindungsmittel (Schrauben, Nägel) aus INOX zu verwenden. Andernfalls tritt eine verstärkte Korrosion auf. Holzdübel sollten nicht eingesetzt werden, statt dessen sollten Plastikdübel verwendet werden.
Verleimbarkeit	es sind bevorzugt PUR-Leime zu verwenden, die Presszeiten sollten ausserdem je nach Klebstoff verlängert werden.

Anhang A3 – spezifische Datenblätter

Es folgen die spezifischen Datenblätter zu den einzelnen thermisch behandelten Hölzern.

Thermisch behandeltes Ahorn



Ahorn unbehandelt



Ahorn Stufe 2



Ahorn Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	-5 bis -15%	-5 bis -15%
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-40 bis -50%	-45 bis -55%
Biege-E-Modul [N/mm ²]	+10 bis +30%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	+5 bis -5%	-40 bis -55%
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	+15 bis -15%	-5 bis -30%
pH-Wert des Holzes	3.8 – 4.0	
Quellung [%]	-30 bis -40%	-30 bis -60%

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen.

Der Ahorn gewinnt durch die thermische Behandlung einen sehr angenehmen dunklen Farbton. Der Farbton ist dabei abhängig von der Behandlungsstärke. Besonders Farbfehler wie Vergilbung oder Lattenabzeichen können weitgehend eliminiert werden und führen zur erhöhten Wertschöpfung.

Während der Biege-E-Modul sogar zunimmt, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte mit steigender Behandlungsstärke ab oder bleiben im ähnlichen Größenbereich. Das Holz wird vor allem bei der Stufe 3 spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 60% vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.

Thermisch behandelte Buche



Buche unbehandelt



Buche Stufe 2



Buche Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	-5 bis -10%	-10 bis -15%
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-20 bis -30%	-25 bis -35%
Biege-E-Modul [N/mm ²]	-10 bis -25%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	-30 bis -45%	-50 bis -65%
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	-15 bis -30%	-40 bis -65%
pH-Wert des Holzes	3.4 – 3.8	
Quellung [%]	-30 bis -40%	-30 bis -60%

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen.

Die Buche gewinnt durch die thermische Behandlung einen sehr warmen dunklen Farbton. Der Farbton ist dabei abhängig von der Behandlungsstärke. Vorhandener Rotkern kann weitgehend angeglichen werden und führt zur erhöhten Wertschöpfung.

Während der Biege-E-Modul weniger stark ändert, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte mit steigender Behandlungsstärke zum Teil erheblich ab. Das Holz wird spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 60 % vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.

Thermisch behandelte Buche („Pollmeier“)



Buche „Pollmeier“ unbehandelt Buche „Pollmeier“ Stufe 2 Buche „Pollmeier“ Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	-0 bis -10%	-0 bis -10%
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-25 bis -35%	-40 bis -55%
Biege-E-Modul [N/mm ²]	-0 bis -10%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	-20 bis -30%	-50 bis -65%
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	-25 bis -40%	-10 bis -30%
pH-Wert des Holzes	3.4 – 3.8	
Quellung [%]	-30 bis -40%	-30 bis -60%

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen.

Die Buche gewinnt durch die thermische Behandlung einen sehr warmen dunklen Farbton. Der Farbton ist dabei abhängig von der Behandlungsstärke. Vorhandener Rotkern kann weitgehend angeglichen werden und führt zur erhöhten Wertschöpfung.

Während der Biege-E-Modul weniger stark ändert, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte mit steigender Behandlungsstärke zum Teil erheblich ab. Das Holz wird spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 60 % vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.

Thermisch behandelte Esche



Esche unbehandelt



Esche Stufe 2



Esche Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	+0 bis +5%	-10 bis -15%
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-25 bis -35%	-45 bis -55%
Biege-E-Modul [N/mm ²]	+10 bis +20%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	-0 bis -10%	-50 bis -60%
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	-10 bis +10%	-35 bis -45%
pH-Wert des Holzes	4.0 – 4.3	
Quellung [%]	-30 bis -40%	-30 bis -60%

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen.

Die Esche gewinnt durch die thermische Behandlung einen sehr warmen dunklen Farbton. Der Farbton ist dabei abhängig von der Behandlungsstärke. Vorhandener Braunkern kann weitgehend angeglichen werden und führt zur erhöhten Wertschöpfung.

Während der Biege-E-Modul sogar leicht zunimmt, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte mit steigender Behandlungsstärke zum Teil erheblich ab. Das Holz wird spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 60 % vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.

Thermisch behandelte Fichte



Fichte unbehandelt



Fichte Stufe 2



Fichte Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	+0 bis +5%	n.g.
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-15 bis -20%	n.g.
Biege-E-Modul [N/mm ²]	+5 bis +10%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	-25 bis -35%	n.g.
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	-5 bis -15%	n.g.
pH-Wert des Holzes	3.4 – 3.7	
Quellung [%]	-30 bis -40%	n.g.

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen. Fichte Stufe 3 wurde nicht geprüft (n.g.)

Die Fichte gewinnt durch die thermische Behandlung der Stufe 2 einen dunkleren Farbton.

Während der Biege-E-Modul leicht zunimmt, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte zum Teil erheblich ab. Das Holz wird spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 40 % vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.

Thermisch behandelte Douglasie-Kern



Douglasie-Kern unbehandelt Douglasie-Kern Stufe 2 Douglasie-Kern Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	-0 bis -5%	-5 bis -10%
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-40 bis -50%	-45 bis -55%
Biege-E-Modul [N/mm ²]	+5 bis +10%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	-0 bis -10%	-5 bis -15%
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	-20 bis -40%	-35 bis -45%
pH-Wert des Holzes	3.4 – 3.7	
Quellung [%]	-30 bis -40%	-30 bis -60%

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen.

Das Douglasien Kernholz gewinnt durch die thermische Behandlung einen dunklen Farbton. Der Farbton ist dabei abhängig von der Behandlungsstärke.

Während der Biege-E-Modul sogar leicht steigt, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte mit steigender Behandlungsstärke ab. Das Holz wird spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 60 % vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.

Thermisch behandelte Douglasie-Splint



Douglasie-Splint unbehandelt Douglasie-Splint Stufe 2 Douglasie-Splint Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	-10 bis -20%	-10 bis -20%
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-20 bis -30%	-50 bis -60%
Biege-E-Modul [N/mm ²]	-10 bis -30%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	-30 bis -40%	-15 bis -25%
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	-45 bis -55%	-20 bis -30%
pH-Wert des Holzes	3.4 – 3.6	
Quellung [%]	-30 bis -40%	-30 bis -60%

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen.

Das Douglasie Splintholz gewinnt durch die thermische Behandlung einen dunkleren Farbton. Der Farbton ist dabei abhängig von der Behandlungsstärke. Der Splint zum Kern kann weitgehend optisch und qualitativ angeglichen werden und führt zur erhöhten Wertschöpfung.

Während der Biege-E-Modul weniger stark ändert, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte zum Teil erheblich ab. Die Abnahme fällt bei Stufe 2 aber stärker aus als bei Stufe 3. Das Holz wird spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 60 % vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.

Thermisch behandelte Föhre-Kern



Föhre-Kern unbehandelt

Föhre-Kern Stufe 2

Föhre-Kern Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	-0 bis -5%	-5 bis -10%
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-15 bis -25%	-35 bis -45%
Biege-E-Modul [N/mm ²]	-5 bis +5%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	-15 bis -25%	-30 bis -40%
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	-5 bis +5%	-10 bis -20%
pH-Wert des Holzes	3.6 – 3.9	
Quellung [%]	-30 bis -40%	-30 bis -60%

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen.

Das Föhren Kernholz gewinnt durch die thermische Behandlung einen dunkleren Farbton. Der Farbton ist dabei abhängig von der Behandlungsstärke.

Während der Biege-E-Modul wenig ändert, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte mit steigender Behandlungsstärke zum Teil erheblich ab. Das Holz wird spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 60 % vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.

Thermisch behandelte Föhre-Splint



Föhre-Splint unbehandelt



Föhre-Splint Stufe 2



Föhre-Splint Stufe 3

	Stufe 2	Stufe 3
Dichte (bei 20°C/65% rel. LF) [kg/m ³]	-5 bis -10%	n.g.
Holzfeuchte (bei 20°C/65% rel. LF) [%]	-30 bis -40%	n.g.
Biege-E-Modul [N/mm ²]	-0 bis -10%	
Biegefestigkeit [N/mm ²]	-30 bis -40%	n.g.
Brinell-Härte senkrecht zur Faserrichtung [N/mm ²]	-15 bis -30%	n.g.
pH-Wert des Holzes	3.7 – 3.9	
Quellung [%]	-30 bis -40%	n.g.

Mittlere Veränderung der Werte in % gegenüber unbehandeltem Holz der gleichen Art. Ausnahme: pH-Wert in absoluten Zahlen. Föhre-Splint Stufe 3 wurde nicht geprüft (n.g.)

Das Föhren Splintholz gewinnt durch die thermische Behandlung einen dunkleren Farbton. Der Splint zum Kern kann weitgehend optisch und qualitativ angeglichen werden und führt zur erhöhten Wertschöpfung.

Während der Biege-E-Modul weniger stark ändert, nehmen alle anderen mechanischen Kennwerte zum Teil erheblich ab. Das Holz wird spröder und somit auch anfälliger für Schläge, etc.

Der pH-Wert des Holzes sinkt ebenfalls. Die Verwendung von geeigneten nicht rostenden Verbindungsmitteln (INOX) wird vorausgesetzt.

Das Quellen des Holzes wird durch die thermische Behandlung um bis zu 40 % vermindert, eine grosse Dimensionsstabilität wird erzielt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt ab.