

# Druckholz – Reaktionsholz der Nadelhölzer

## *Ausgewählte Eigenschaften und wesentliche Unterschiede zum normalen Holzgewebe*

Zuerst veröffentlicht in: Holz-Zentralblatt, 2012, 138. Jg., Nr. 43, S. 1104, 1105, 1107

Von Michael Rosenthal\*, Ernst Bäucker\*, Tharandt

\*Dr.-Ing. Michael Rosenthal und Dipl.-Forsting. Ernst Bäucker sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der Professur für Forstnutzung der TU Dresden

**Druckholz, das Reaktionsholz der Nadelgehölze, weicht in vielfältiger Weise vom normalen Stammholz ab: sein hoher Ligningehalt, die flach-schraubige Orientierung der Fibrillen und die Dickwandigkeit der im Querschnitt runden Tracheiden bewirken eine rotbraune Färbung des Holzes, eine höhere Rohdichte, eine höhere Längsschwindung und eine geringere Zugfestigkeit. Die Eigenschaftsveränderungen des Holzes infolge des Vorhandenseins von Druckholz sind im Bereich der Holzbearbeitung zumeist nicht erwünscht. Druckholz kann jedoch auch gezielt zur Herstellung technologisch anspruchsvoller Produkte eingesetzt werden.**

Als Reaktionsholz bezeichnet man spezielle Holzgewebe, die es Bäumen ermöglichen, sich in bestimmten Richtungen zu orientieren (Richtgewebe). Während das Reaktionsholz der Nadelbäume vor allem auf der Unterseite schiefstehender Bäume bzw. Äste zu finden ist und vorwiegend durch Druckkräfte wirksam wird (Druckholz), liegt das Zugholz der Laubbäume zumeist auf der Oberseite geneigter Sprossachsen und wirkt durch die Bildung von Zugkräften. Druckholzähnliche Strukturen können auch bei Laubbäumen auftreten, deren Holz hauptsächlich aus Tracheiden aufgebaut ist (Höster & Liese, 1966), z.B. bei *Buxus sempervirens* (Timell, 1983; Baillères et al., 1997).

Tabelle 1 Chemische Zusammensetzung des Druck- und Normalholzes von Nadelhölzern in Gewichtsprozent (Schwerin, 1958; Côté & Day, 1965; Young et al., 1970; Timell, 1982, 1986; Gindl, 2002; Fengel & Wegener, 2003; Bertaud & Holmbom, 2004)

Bestandteil	Druckholz	Normalholz
Lignin	35 ... 41	22 ... 32
Cellulose	29 ... 31	38 ... 47
Galactoglucomannan	8 ... 9	15 ... 18
Galactan	9 ... 11	-
Xylan	7 ... 12	8 ... 12
Sonstige	ca. 4	ca. 2

Druckholz und das normale Stammholz unterscheiden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung teilweise deutlich voneinander (Tab. 1). Bei Druckholz ist der Anteil an Lignin und Galactan erhöht, der Cellulose- und Galactoglucomannangehalt hingegen reduziert. Auch auf anatomischer Ebene existieren zahlreiche Unterschiede. Zwar sind Druck- und Normalholz aus den gleichen Zelltypen – zu über 90 % aus Längstracheiden (Wagenführ, 1999) – aufgebaut, jedoch weicht die Ausformung der Zellen in beiden Gewebetypen teilweise erheblich voneinander ab. Auf die anatomischen

Unterschiede und die daraus resultierenden abweichenden Holzeigenschaften wird im Folgenden ausführlich eingegangen. Bereits vorgestellt wurden in diesem Zusammenhang der Zellwandbau von Normalholztracheiden (HZ 138: 10 f.) und die mikroskopische Struktur von Fichtenholz (HZ 138: 451 f.). Der Beitrag baut auf den genannten Veröffentlichungen auf.

### Submikroskopische Struktur

Das Tracheidengewebe des Druckholzes ist durch das Vorhandsein zahlreicher **Interzellularräume** gekennzeichnet (Abb. 1, 2), welche im Normalholz meist fehlen (Timell, 1986). Interzellularen sind leere Regionen, in die weder Lignin noch Polysaccharide abgelagert sind. Vermutlich steht die fehlende Lignifizierung der Interzellularen in Zusammenhang mit den runden Tracheidenquerschnitten der Druckholzzellen (Côté & Day, 1965).

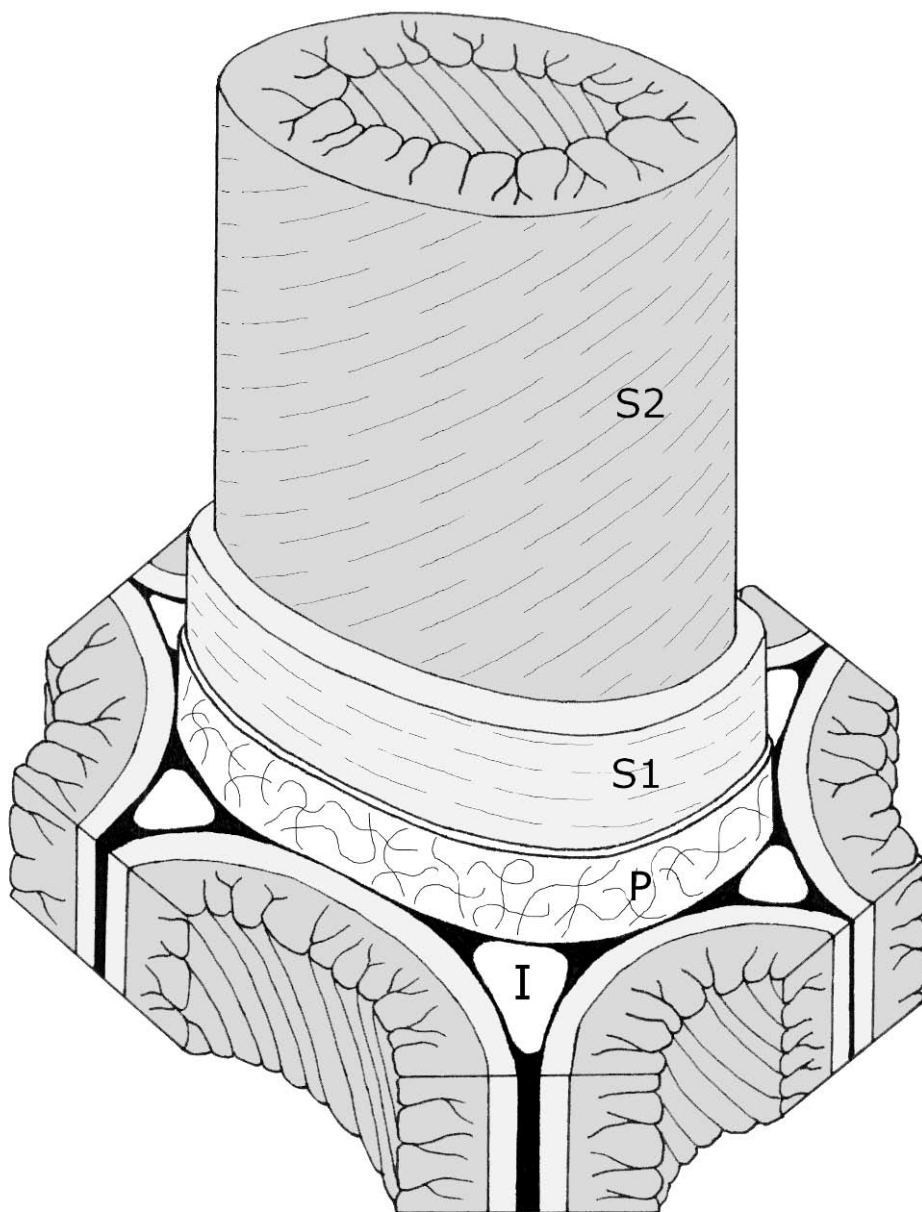


Abbildung 1 Zellwandmodell einer Druckholzzelle mit Interzellularen (I), Mittellamelle (schwarz), Primärwand (P) und den Sekundärwänden S1 und S2 (Rosenthal, 2009)

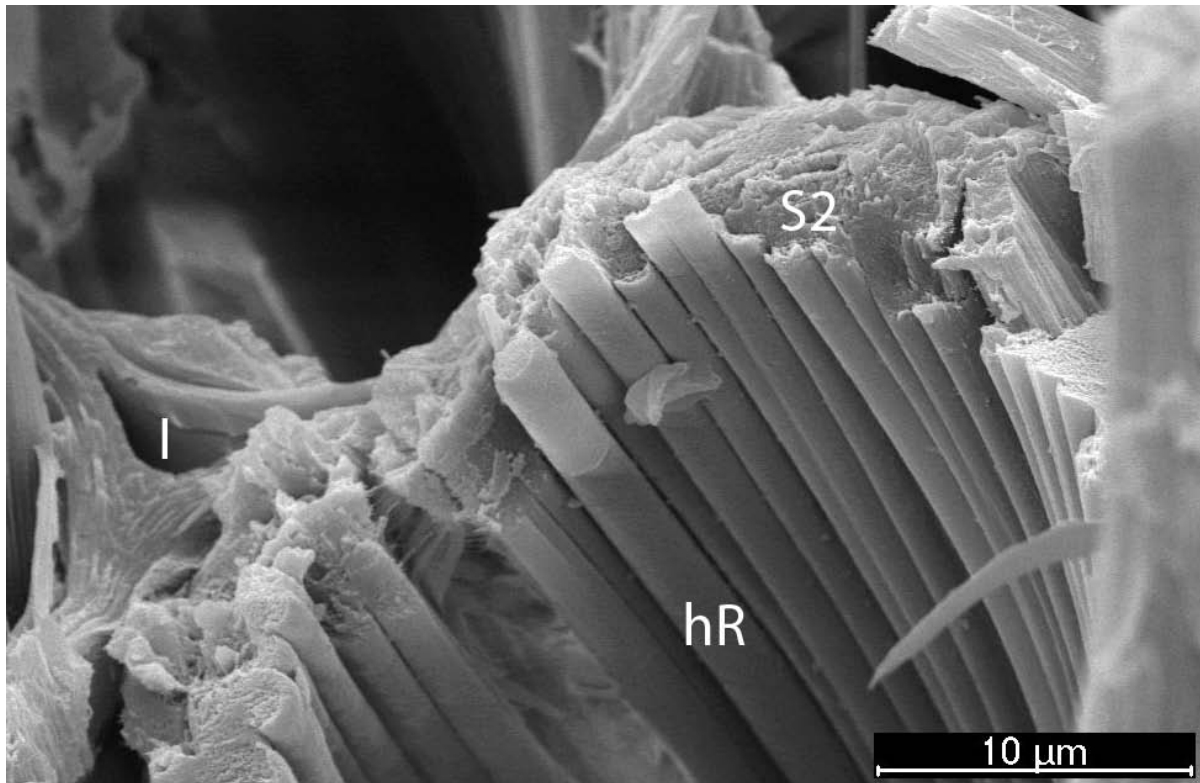


Abbildung 2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (Querbruch) einer Druckholzzelle (*Picea abies* [L.] Karst.) mit Interzellulare (I) und helixförmigen Rippen (hR) in der Sekundärwand 2

Zwischen der **Primärwand** von Normal- und Druckholz gibt es kaum strukturelle Unterschiede. Sowohl **Mittellamelle** als auch Primärwand sind im Druckholz jedoch weniger stark lignifiziert als im Normalholz (Timell, 1986; Donaldson et al., 2004).

Die Mikrofibrillen der **Sekundärwand 1** besitzen im Druckholz eine ähnliche Orientierung wie im Normalholz, der Mikrofibrillenwinkel streut in engen Grenzen um einen Mittelwert von ca. 90° (Brändström, 2004). Die S1 ist jedoch im Druckholz beträchtlich dicker als im Normalholz und kann in den Zellecken sogar die Dicke der S2 erreichen (Timell, 1986). Aufgrund ihrer Mächtigkeit hat sie einen größeren Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften. Der Ligningehalt liegt bei 20 ... 25 % im Normalholz und 29 ... 40 % im Druckholz (Fergus et al., 1969; Timell, 1986).

Für die **Sekundärwand 2** wird mit wenigen Ausnahmen (Donaldson & Turner, 2001) von größeren Mikrofibrillenwinkeln für Druckholz i. Vgl. zu Normalholz berichtet. Häufig wird für Druckholz ein Wert von 45° genannt; es ist jedoch korrekter, von einem Bereich von 30° bis 50° zu sprechen, in dem der Mikrofibrillenwinkel schwankt (Hartig, 1896; Münch, 1938; Timell, 1986; Färber et al., 2001; Burgert et al., 2004; Donaldson et al., 2004; Gindl et al., 2004). Die höchsten Werte, die beobachtet wurden, liegen bei 71° bis 78° (Sonntag, 1909; Cockrell, 1974). Bei schwach ausgebildetem Druckholz ist der Mikrofibrillenwinkel niedriger als bei voll ausgebildetem (Timell, 1986).

Innerhalb der Sekundärwand 2 wird bei Druckholz zwischen einem äußeren und einem inneren Bereich unterschieden. Der äußere Teil besitzt einen geringeren Cellulosegehalt und einen höheren Ligningehalt (40 ... 60 %) als die übrige S2 und wird deshalb auch als S2(L) bezeichnet (wobei L für Lignin steht); der Ligningehalt des inneren Bereiches liegt bei 30 ... 40 % (Côté & Day, 1965; Côté et al., 1966; Timell, 1986; Donaldson et al., 1999; Gindl et al., 2004). Der innere Bereich der S2 wird von helixförmigen radialen Spalten (helical cavities) durchzogen, die leer, d.h. nicht mit Lignin gefüllt sind

(Casperson & Zinsser, 1965) und in ihrer Orientierung den Mikrofibrillen folgen (Côté & Day, 1965; Timell, 1986; Sedighi-Gilani et al., 2005). Sie besitzen eine Breite von 0,1 µm und eine Tiefe von 0,5 ... 1,0 ... 1,5 µm (Casperson, 1962), wobei eine Verzweigung bzw. Vergabelung in Richtung der S2(L) erfolgt. Infolge der helixförmigen Spalten ist das Zellwandmaterial in den inneren zwei Dritteln der S2 der Druckholztracheiden in Form von helixförmigen Rippen (helical ribs, Abb. 2) organisiert, die eine Breite von 1 ... 2 µm besitzen (Casperson, 1962).

Im Rahmen der graduellen Abstufung der Druckholzausprägung von voll zu schwach ausgebildetem Druckholz sind die helixförmigen Spalten in der S2 das erste Charakteristikum, das verschwindet. Timell (1978a,b) weist auf Parallelen zur phylogenetischen Entwicklung hin. Als lebenswichtiges Gewebe der Nacktsamer ist Druckholz seit etwa 300 Millionen Jahren nachgewiesen (Timell, 1983). Die Entwicklung, die es seit dieser Zeit durchgemacht hat, wird für die beobachteten Unterschiede zwischen den Baumarten verantwortlich gemacht. So sind bei den relativ früh entstandenen Familien der Ginkgo-, Eiben- und Araukariengewächse generell keine helixförmigen Spalten zu finden; sie treten erst bei den stammesgeschichtlich jüngeren Kieferngewächsen auf.

Die **Sekundärwand 3** fehlt normalerweise im Druckholz (Côté & Day, 1965; Takabe et al., 1992), unter Umständen kann sie in schwach ausgebildetem Druckholz jedoch auftreten (Singh et al., 2003). Nach Yoshizawa et al. (1992) ist die Abwesenheit der S3 das erste anatomische Merkmal beim Übergang von Normalholz zu Druckholz.

## Mikroskopische Struktur

In longitudinaler Richtung stellen die Tracheiden den bestimmenden Gewebetyp der Nadelhölzer dar. Die **Tracheidenlänge** liegt im Normalholz der Fichte bei 1,3 ... 4,8 mm (Wagenführ, 2007). Die Frühholztracheiden sind kürzer als die Spätholztracheiden (Mäkinen et al., 2002). Druckholztracheiden sind noch kürzer; ihre Länge beträgt 60 ... 80 % der von Normalholztracheiden (Seth & Jain, 1977; Timell, 1986). Ein Grund dafür könnte in den deformierten Tracheidenenden von Druckholztracheiden zu suchen sein. Die Zellenden sind gekrümmt und die Zellwände gewellt bzw. gefaltet, ähnlich als wären sie durch longitudinalen Druck gestaucht.

Nach Schmidt-Vogt (1986) beträgt der durchschnittliche tangentielle **Tracheidendurchmesser** über den Jahrring im adulten Holz der Fichte gleichbleibend 30 ... 40 µm, die radialen Durchmesser sind über den Jahrring bei Normalholz jedoch unterschiedlich. Für Frühholztracheiden liegen die Werte bei 30 ... 40 µm, für Spätholztracheiden bei 12 ... 20 µm (Bernhart, 1964; Fengel & Stoll, 1973). Der Durchmesser der Druckholztracheiden liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie der von Normalholztracheiden. Allerdings fehlt bei Druckholz der ausgeprägte Unterschied zwischen den radialen Durchmessern der Früh- und Spätholztracheiden wie bei Normalholz (Timell, 1986).

Hinsichtlich der **Zellwanddicke** gibt es im Normalholz starke Unterschiede zwischen Früh- und Spätholz. Im Frühholz liegen die Werte bei 1,0 ... 4,3 µm, im Spätholz bei 4,3 ... 7,5 µm (Mäkinen et al., 2002; Sarén et al., 2004; Wagenführ, 2007). Die Zellwanddicke der Druckholztracheiden übersteigt wiederum die des Spätholzes von Normalholz (Timell, 1986).

Die Anzahl und die Größe sowohl der **Holzstrahlen** als auch der Holzstrahlzellen sind im Druckholz beträchtlich größer als im Normalholz (Timell, 1972a). In der chemischen Zusammensetzung und der submikroskopischen Struktur stimmen die Holzstrahlen der beiden Gewebetypen jedoch überein (Timell, 1986).

Selbst in vollausgebildetem Druckholz bestehen nur ca. 90 % des **Jahrringes** aus Tracheiden, die alle Charakteristika von Druckholz besitzen. 5 ... 10 % des Jahrringes bestehen aus früh und bis zu 2 % aus spät in der Vegetationsperiode gebildeten Tracheiden (Timell, 1986). Die im Jahrring zuerst gebildeten Tracheiden (first-formed tracheids) sind dünnwandiger als die übrigen Druckholzzellen, jedoch dickwandiger als die Frühholzzellen im Normalholz (Hartig, 1896). Sie sind so hell wie Normalholz, enthalten keine Sekundärwand 3 und haben einen eckigen Querschnitt, wodurch Interzellularräume fehlen (Timell, 1986; Bodner, 1997). Nach der Meinung einiger Forscher (Seth & Jain, 1977; Jain & Seth, 1980; Seth, 1981) sind sie deshalb als Normalholzzellen anzusehen. Da sie eine ähnliche Mikrofibrillenorientierung aufweisen und helixförmige Spalten besitzen, die zwar oft fehlen oder nur schwach entwickelt sind, gehen Timell (1986) und Bodner (1997) allerdings davon aus, dass auch diese Zellen als Druckholz zu bezeichnen sind. Im Falle der zuletzt gebildeten Tracheiden (last-formed tracheids) wurde von Schultze-Dewitz et al. (1971) behauptet, dass sie mit Normalholz identisch sind. Mit Ausnahme der Abflachung der Zellen in radialer Richtung und des häufigen Fehlens von Interzellularräumen stimmen sie jedoch in allen anderen strukturellen Eigenschaften mit typischen Druckholztracheiden überein (Timell, 1972b). Ein besonderes Charakteristikum dieser Zellform besteht darin, dass die S1 dazu neigt, in den Zellecken sehr dick zu werden, sodass ihre Dicke in diesen Bereichen sogar die der S2 übersteigen kann (Timell, 1986).

Die genannten Unterschiede rechtfertigen es nach Casperson (1962), Shelbourne & Ritchie (1968), Timell (1986), Wagenführ (1989) und Bodner (1997) nicht, die im Jahrring zuerst und zuletzt gebildeten Tracheiden als Früh- bzw. Spätholz zu bezeichnen. Im Vergleich zum Normalholz ist der Übergang zwischen den verschiedenen Jahrringbereichen im Druckholz aufgrund der dickeren Tracheidenwände der zuerst gebildeten Tracheiden allmählicher (Côté & Day, 1965). So erscheint der gesamte Druckholz-Jahrring im Allgemeinen deutlich uniformer in seiner Struktur (Abb. 3).

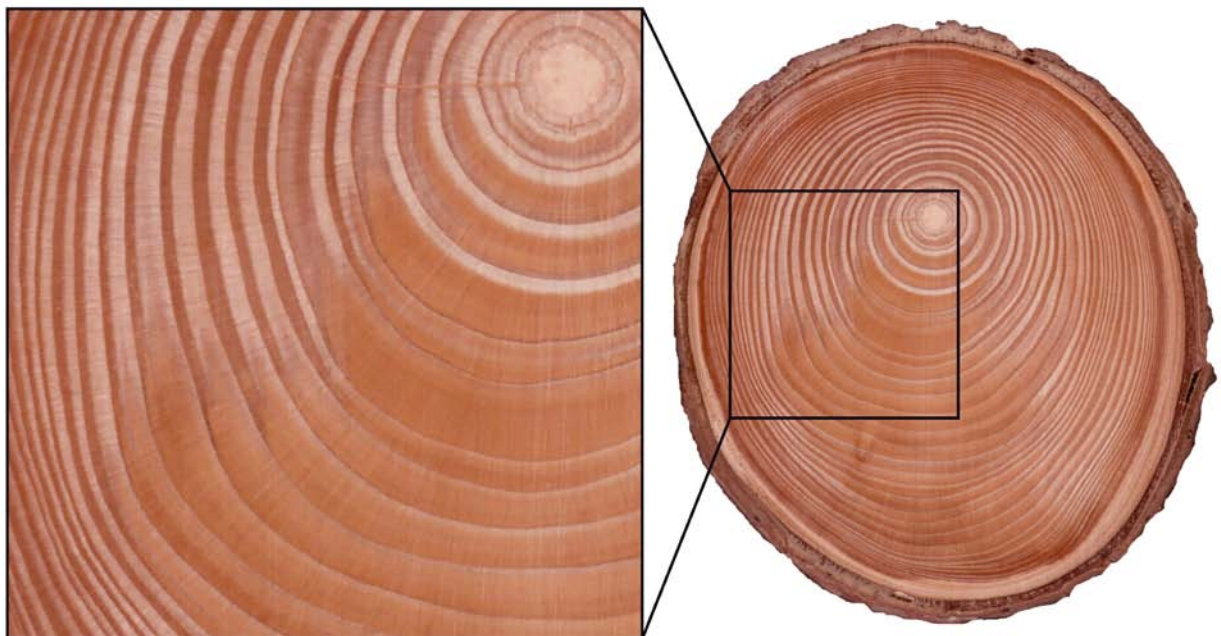


Abbildung 3 Querschnitt eines Fichtenastes (*Picea abies* [L.] Karst.), Bildausschnitt: Druckholz (rechts unten), Normalholz (links oben)



## Druckholz als Richtgewebe

Als aktives Richtgewebe ermöglicht Druckholz eine Stabilisierung bzw. Reorientierung der unter äußerer Beanspruchung (Gravitationsfeld der Erde, Schneelast, Wind) stehenden Stamm- und Astbereiche (Abb. 4, 5). Verantwortlich hierfür sind Wachstumsspannungen, die während der Zelldifferenzierung im Kambium entstehen (Archer, 1986; Fournier et al., 1994). Ihre Entstehung wird von zwei Theorien zu erklären versucht: Im Zuge des Zellwandaufbaus kommt es zur Ablagerung von Cellulosefibrillen. Diese befinden sich anfangs in einem nur teilweise kristallinen Zustand. Eine weitere Kristallisation erfolgt erst, nachdem die Lignifizierung der Zellwand einsetzt (Wardrop, 1965). Nach Bamber (1987) führt eine Erhöhung der Kristallinität zu einer axialen Kontraktion der Fibrillen (Cellulose Tension Theory). Während der sich anschließenden Lignifizierung der Zellwand werden die sich einlagernden Ligninmoleküle gezwungen, die Räume zwischen den bereits bestehenden Cellulosefibrillen zu füllen (Hafrén et al., 1999; Fengel & Wegener, 2003). Dadurch kommt es nach Boyd (1985) zur Bildung von Druckspannungen senkrecht zur Fibrillenrichtung und zu Zugspannungen parallel zur Fibrillenrichtung (Lignin Swelling Theory).



Abbildung 4 Reorientierung von Stammbereichen durch Druckholz (*Picea abies* [L.] Karst.)



Abbildung 5 Stabilisierung von Ästen durch Druckholz – entscheidend insbesondere für Starkäste im Waldrandbereich

In Geweben mit niedrigem Mikrofibrillenwinkel (d.h. mit steilem Fibrillenanstieg) führen diese Wachstumsspannungen zu Zugspannungen in Faserrichtung. Ab einem Mikrofibrillenwinkel von über  $30^\circ$  (Yamamoto, 1998) kommt es dagegen zur Bildung von Druckspannungen in Faserrichtung (Bamber, 2001; Burgert & Jungnikl, 2004). Nach Burgert et al. (2007) ist die Bildung von Druckspannungen in starkem Maße von der Möglichkeit einer Torsion der Zellen abhängig. Im Normalholz ist sie aufgrund der hexagonalen Zellform und der starken Lignifizierung der Mittellamelle ausgeschlossen. Bei Druckholzzellen ist eine leichte Verdrehung jedoch möglich, da diese sowohl einen runden Querschnitt und helixförmige Spalten in der S<sub>2</sub>, als auch eine geringer lignifizierte Mittellamelle besitzen.

### Ausgewählte Holzeigenschaften

Die beschriebenen chemischen und anatomischen Unterschiede zwischen Druck- und Normalholz wirken sich in vielfältiger Weise auf die physikalischen Eigenschaften aus. Im Folgenden soll auf die optischen Eigenschaften, die Dichte, Sorptionseigenschaften, das Quell- und Schwindverhalten und elastomechanische bzw. Festigkeitseigenschaften von Druckholz eingegangen werden.

- Druckholz unterscheidet sich makroskopisch von Normalholz durch seine dunklere, rötliche **Farbe** (Abb. 3) und wird deshalb auch als „Rotholz“ bezeichnet (Timell, 1986). Verschiedene Detektionsmethoden haben sich diesen Umstand zunutze gemacht (Andersson & Walter, 1995; Nyström & Hagman, 1999). Die Farbe von Holz wird vornehmlich von zwei Faktoren beeinflusst: den Absorptionseigenschaften der chemischen Bestandteile und der Lichtstreuung der

Oberfläche. Die Absorption wird von chromophoren Gruppen bestimmt, die nur in geringen Mengen in Polysacchariden, jedoch häufig im Lignin vorhanden sind. Douek & Goring (1976) berichten, dass die Lichtabsorption in direktem Zusammenhang mit dem Ligningehalt des Holzes steht. Der hohe Ligningehalt von Druckholz ist damit ein Grund für die dunklere Färbung (Wernsdörfer et al., 2004). Eine andere Ursache ist die Dickwandigkeit der Tracheiden im Druckholz (ähnlich wie im Spätholz von Normalholz) und die damit einhergehende geringere Lichtstreuung, die für die Dunkelfärbung verantwortlich ist. Während der Holz Trocknung verlieren die Druckholzzellen ihren kompakten Charakter. Luft dringt in die helixförmigen Spalten ein - die Lichtstreuung erhöht sich und das Druckholz verblasst. Eine Wiederbefeuchtung oder ein Lackieren der Oberfläche füllt Lumen und Spalten auf und die intensive Färbung stellt sich wieder ein (Timell, 1986).

- Die **Rohdichte** des Normalholzes von Fichte liegt bei 0,33 ... 0,47 ... 0,68 g/cm<sup>3</sup> (Wagenführ, 2007). Mit zunehmender Druckholzausprägung steigt sie auf 0,45 ... 0,8 g/cm<sup>3</sup> an (Rothe, 1930; Timell, 1982, 1986; Donaldson et al., 2004; Rosenthal, 2009).
- Holz ist als hygroskopischer Stoff in der Lage, aus Gasen Wasser aufzunehmen. Alle chemischen Bestandteile der verholzten Zellwand besitzen eine gewisse Affinität für Wasser. Die geringste Affinität ist bei Lignin zu finden (Kollmann, 1951). Aufgrund der stärkeren Lignifizierung kommt es mit zunehmender Druckholzausprägung zu einem Absinken des **Fasersättigungspunktes**, d.h. die Fähigkeit, Wasser in der Zellwand zu binden, sinkt. In vollausgebildetem Druckholz liegt der Fasersättigungspunkt bei einer Holzfeuchte von 20 ... 30 % und damit um 5 ... 20 % niedriger als bei Normalholz (Trendelenburg, 1932; Timell, 1986).
- Normal- und Druckholz weisen infolge ihrer strukturellen Unterschiede ein abweichendes **Quell- und Schwindverhalten** auf. Druckholz besitzt eine deutlich höhere Längsschwindung, jedoch ein niedrigeres Schwindmaß in radialer und tangentialer Richtung im Vergleich zu Normalholz (Tab. 2). Das verstärkte Schwinden von Druckholz in longitudinaler Richtung ist v.a. dem von Normalholz abweichenden Zellwandaufbau, insbesondere einer dickeren S1 und einem größeren Mikrofibrillenwinkel der S2 zuzuschreiben (Bernhart, 1965; Wooten et al., 1967; Meylan, 1972; Boyd, 1977; Timell, 1986): Die Bindung des Wassers in der Zellwand erfolgt hauptsächlich in den intermicellaren Spalten, die parallel zur Fibrillenachse orientiert sind. Bei der Holz Trocknung kommt es daher zu einer Reduktion des Fibrillendurchmessers. Dies führt aufgrund des flacheren Fibrillenanstieges bei Druckholz zu höheren Schwindmaßen in Längsrichtung der Zellen.

Tabelle 2 Longitudinales, radiales und tangenciales Schwindmaß von Normal- und Druckholz (vom grünen zum darrtrockenen Zustand, in Prozent des Grünvolumens) (Trendelenburg, 1932; Côté & Day, 1965; Timell, 1986; Wagenführ, 2007; Abe & Yamamoto, 2006)

	Normalholz	Druckholz
longitudinal	0,18 ... 0,3	0,58 ... 7,0
radial	3,4 ... 7,12	2,21 ... 3,26
tangential	6,70 ... 8,05	3,14 ... 4,60

- Bei **Längszugbelastung** liegt die Festigkeit und der Elastizitätsmodul von Druckholz um bis zu 65 % niedriger als bei Normalholz, die Bruchdehnung kann (im fasergesättigten Zustand) um den



Faktor fünf und mehr erhöht sein (Rosenthal, 2009). Die Hauptverantwortung dafür trägt der größere Mikrofibrillenwinkel der Druckholzzelle (Abb. 6) (Bernhart, 1966; Mark, 1967; Seeling, 1999; Yang & Evans, 2003; Burgert et al., 2004). Dies betrifft insbesondere die S2; aber auch die S1 hat aufgrund ihrer erhöhten Wanddicke einen nicht unwesentlichen Anteil daran (Timell, 1986; Bergander & Salmén, 2002; Burgert et al., 2004). Als weitere Ursachen werden der höhere Ligningehalt und die geringe Kohäsion zwischen den Tracheiden (bedingt durch zahlreiche Interzellularräume und die geringe Lignifizierung der Mittellamelle) genannt.

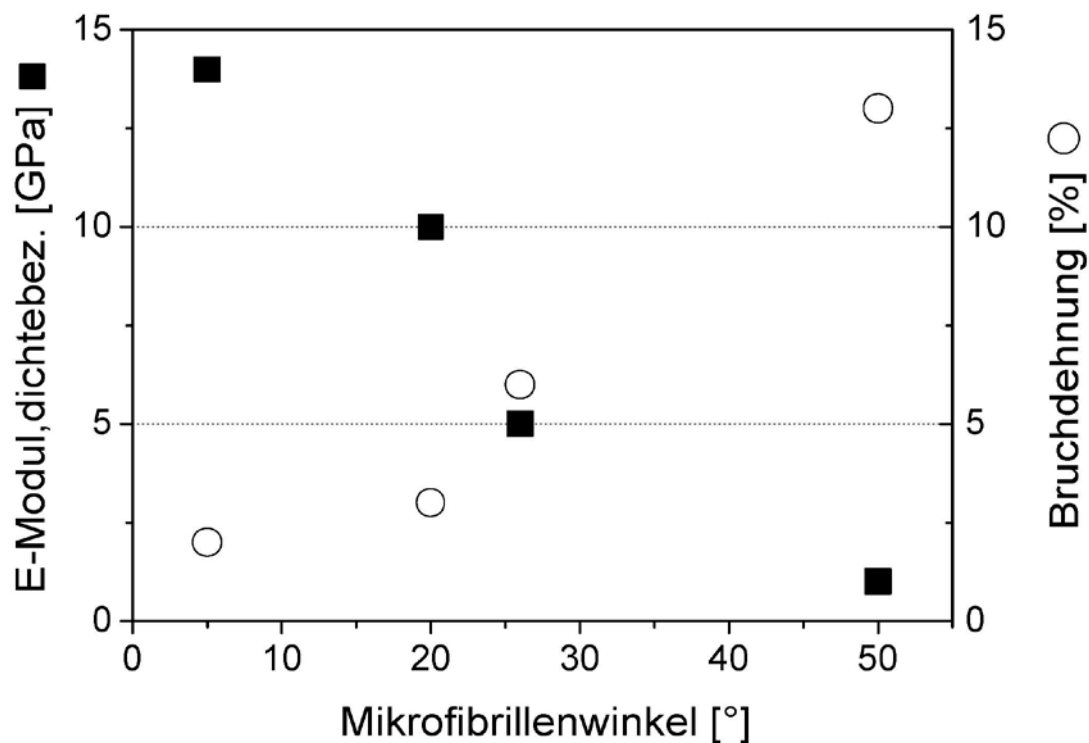


Abbildung 6 Elastizitätsmodul und Bruchdehnung in Abhängigkeit vom Mikrofibrillenwinkel (nach Reiterer et al., 1999)

Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm sind bei fasergesättigtem Druckholz mehrere Phasen zu erkennen (Abb. 7). Die erste Phase zeigt ein linear elastisches Verhalten und ist in ähnlicher Form auch bei Normalholz zu finden. Nach dem Überschreiten der Fließgrenze ist ein zweiter linearer Bereich mit einem geringeren Anstieg zu erkennen (zweite Phase). Bei großen Mikrofibrillenwinkeln kommt es unter Längszugbelastung zu einer Ausbildung von Scherspannungen in der Zellwand (Navi et al., 1995; Spatz et al., 1999; Köhler & Spatz, 2002). Wird eine bestimmte Scherspannung überschritten, brechen Wasserstoffbrückenbindungen auf, wodurch ein Abgleiten der Cellulosefibrillen aneinander möglich wird und Verformungen von über 30 % (Burgert et al., 2004) erreicht werden können. Wird die Spannung zurückgesetzt, gibt es kein Zurückfließen in die Ausgangsposition, sondern ein Einrasten an der neuen Position – ein Mechanismus, der nach Keckes et al. (2003) mit dem Verhalten eines Klettverschlusses vergleichbar ist. Bei einer Dehnung von über 10 % kommt es aufgrund der Reduktion des Mikrofibrillenwinkels zu einer Erhöhung der Steifigkeit (dritte Phase).

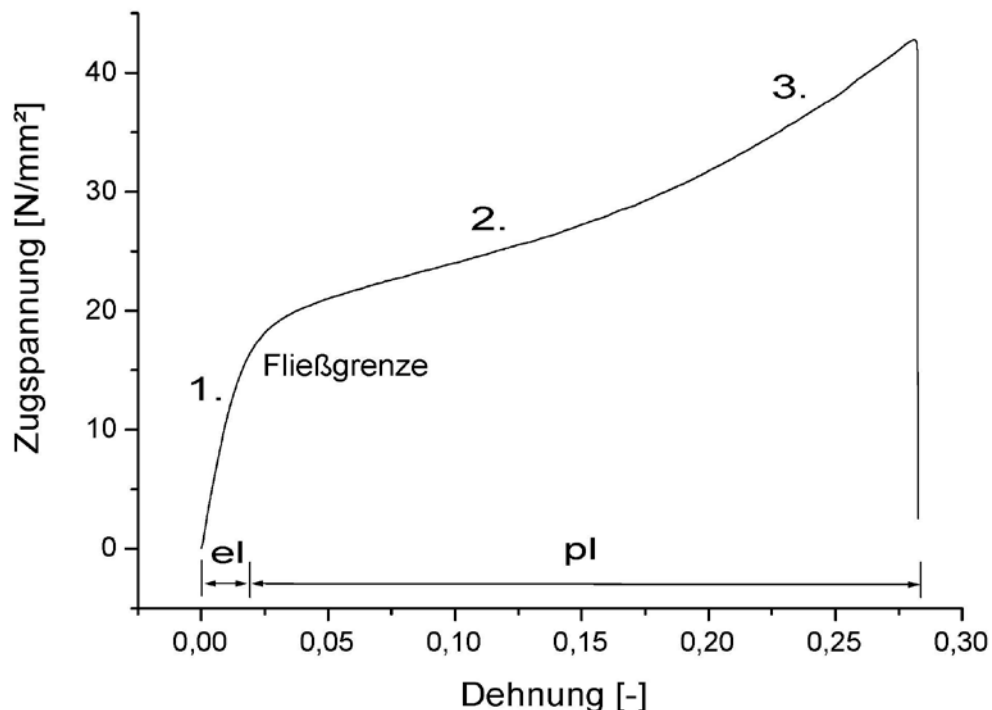


Abbildung 7 Exemplarische Spannungs-Dehnungs-Kurve von Druckholz (fasergesättigter Mikrotomschnitt, *Picea abies* [L.] Karst.) mit unterschiedlichen Phasen des Zugversuches (1 ... 3) und den Bereichen elastischer (el) bzw. plastischer Verformung (pl) (Rosenthal, 2009)

- Unter **Druckbelastung** ist die Festigkeit von Druckholz im Allgemeinen höher als die von Normalholz. Gindl (2002) geht normalerweise von einer Abnahme der Druckfestigkeit mit steigendem Mikrofibrillenwinkel aus. Dieser Einfluss wird jedoch zum einen durch die erhöhte Ligninkonzentration und -kondensation bei Druckholz (Timell, 1986; Ruel et al., 1999; Gindl, 2002) und zum anderen durch die größere Menge an Zellwandsubstanz pro Volumen mehr als kompensiert, sodass die genannte erhöhte Druckfestigkeit resultiert.

## Verwendung

Die infolge des Vorhandenseins von Druckholz veränderten physikalischen Holzeigenschaften ziehen zumeist unerwünschte Verwendungseigenschaften nach sich. Dies beginnt bereits bei der Fällung druckholzhaltiger Stämme. Durch das Freiwerden angestauter Druckspannungen kommt es beim Fällschnitt häufig zu einem Klemmen der Säge. Beim Einschneiden des Holzes führen diese Spannungen zu Krümmungen des Sägeblockes bzw. einem Abgleiten der Säge (Knigge, 1958). Wegen seiner Härte und Sprödigkeit gilt Druckholz im Allgemeinen als schwer bearbeitbar. Die geringere Belastbarkeit schränkt die Eignung als Konstruktionsholz ein. Hinzu kommt, dass Holz mit hohem Druckholzanteil stark arbeitet. Druckholz tritt im gewachsenen Gefüge in enger Nachbarschaft zu Normalholz auf und so führen die abweichenden Quell- und Schwindmaße bei einer Änderung der Holzfeuchte zu einem Verwerfen des Schnittholzes (Du Toit, 1963; Schulz et al., 1984; Ormarsson, 1999). Folgerichtig zieht das Überschreiten eines bestimmten Druckholzanteils sowohl in der Rundholz- (DIN EN 1927-1) als auch in der Schnittholzsortierung (DIN 4074, DIN EN 1611-1) eine Absortierung in eine schlechtere Qualitäts- bzw. Sortierklasse nach sich.

Bei einer Auflösung des gewachsenen Holzgefüges im Zuge der Herstellung von Zellstoff bzw. Holzwerkstoffen sinkt der Einfluss der Druckholzeigenschaften, da sie sich im industriellen Fertigungsgang und in den Eigenschaften des Endprodukts nur in zu vernachlässigendem Umfang auswirken. Zwar ist druckholzhaltiger Faserstoff von geringerem Wert, da seine Fasern spröder und kürzer sind (Knigge, 1958). Aus Druckholz hergestellte Holzwerkstoffe können jedoch auch vorteilhafte Eigenschaften aufweisen. So besitzen mitteldichte Faserplatten aus Druckholz höhere Querkzugfestigkeitswerte und eine höhere Oberflächenhärte (Brinell-Härte) als aus Normalholz hergestellte (Roffael et al., 2005).

Eine vorteilhafte Verwendungseigenschaft ist die außerordentliche Dehnbarkeit von Druckholzzellen, die bei der dreidimensionalen Umformung von Furnieren nutzbar gemacht werden kann (Abb. 8). Die bisher bei der Verarbeitung von Furnieren erreichten Verformungsgrade lassen sich bei der Verwendung von fasergesättigten, mehrlagigen Druckholzfurnieren um einen Faktor von 2 ... 3 erhöhen (Rosenthal, 2009).

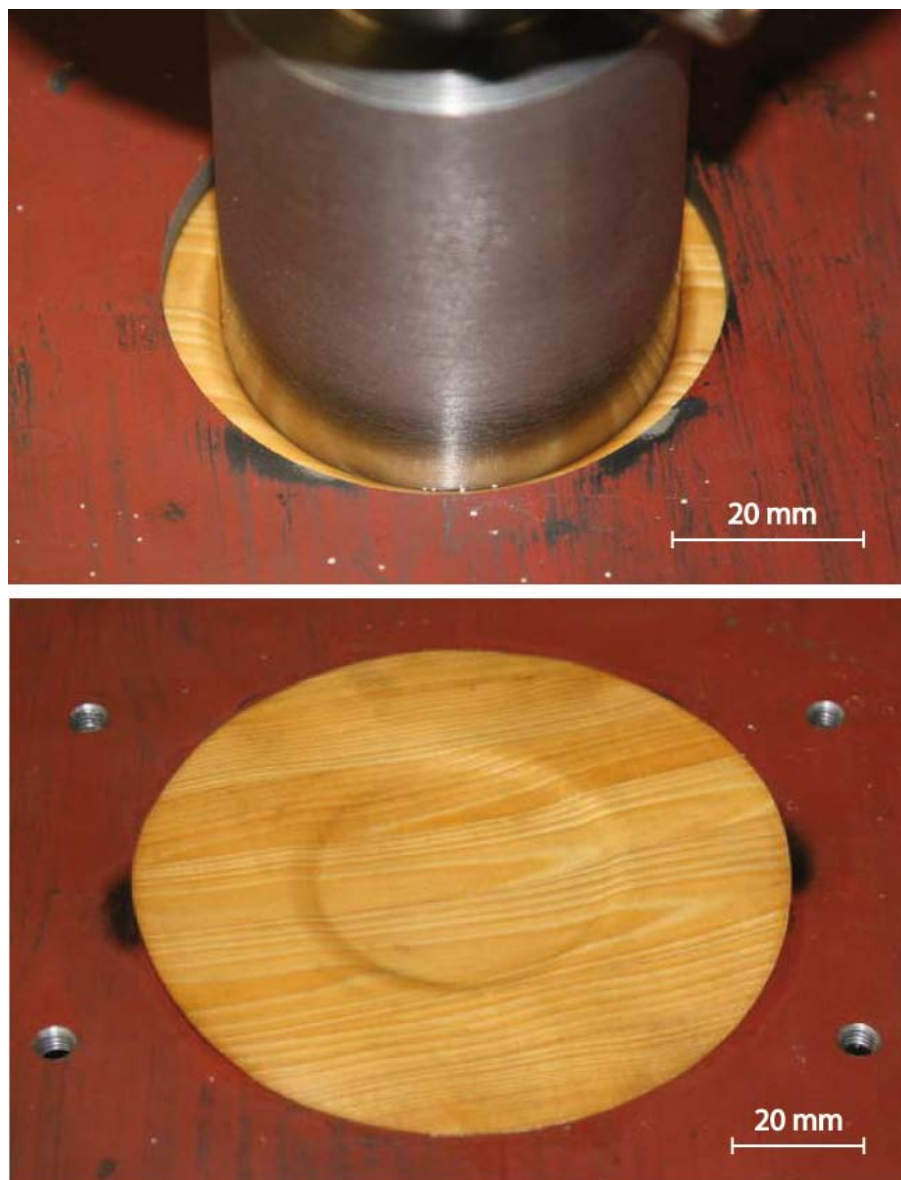


Abbildung 8 Plastische dreidimensionale Verformung von zweilagigen Druckholzfurnieren (Rosenthal, 2009)

## Literatur

- Abe, K. & Yamamoto, H. (2006): Behavior of the cellulose microfibril in shrinking woods. J. Wood Sci. 52: 15–19
- Andersson, C. & Walter, F. (1995): Classification of Compression Wood Using Digital Image Analysis. For. Prod. J. 45: 87–92
- Archer, R. R. (1986): Growth stresses and strains in trees. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo
- Baillères, H., Castan, M., Monties, B., Pollet, B., Lapierre, C. (1997): Lignin structure in *Buxus sempervirens* reaction wood. Phytochemistry 44(1): 35–39
- Bamber, R. K. (1987): The origin of growth stresses: A rebuttal. IAWA Bull. 8: 80–84
- Bamber, R. K. (2001): A general theory for the origin of growth stresses in reaction wood: How trees stay upright. IAWA J. 22(3): 205–212
- Bergander, A. & Salmén, L. (2002): Cell wall properties and their affects on the mechanical properties of fibers. J. Mater. Sci. 37(1): 151–156
- Bernhart, A. (1964): Über die Rohdichte von Fichtenholz. Holz Roh- Werkst. 22: 215–228
- Bernhart, A. (1965): Frischfeuchtigkeit und Schwindverhalten von Fichtenholz. Forstwiss. Cbl. 84: 347–356
- Bernhart, A. (1966): Über die statische und dynamische Kurzzeitfestigkeit von Fichtenholz - absolut, roh-dichtebezogen und unter Druckholzeinfluss. Forstwiss. Cbl.: 275–295
- Bertaud, F. & Holmbom, B. (2004): Chemical composition of earlywood and latewood in Norway spruce heartwood, sapwood and transition zone wood. Wood Sci. Technol. 38: 245–256
- Bodner, J. (1997): Ultrastrukturelles Bruchverhalten von Holz. Universität für Bodenkultur, Habilitation
- Boyd, J. D. (1977): Relationship between fibre morphology and shrinkage of wood. Wood Sci. Technol. 11: 3–22
- Boyd, J. D. (1985): The key factor in growth stress generation in trees. Lignification or crystallisation. IAWA Bull. 6: 139–150
- Brändström, J. (2004): Microfibril angle of the S1 cell wall layer of Norway spruce compression wood tracheids. IAWA J. 25(4): 415–423
- Burgert, I., Frühmann, K., Keckes, J., Fratzl, P. & Stanzl-Tschegg, S. (2004): Structure-function relationships of four compression wood types: micromechanical properties at the tissue and fibre level. Trees 18: 480–485
- Burgert, I. & Jungnikl, K. (2004): Adaptive Growth of Gymnosperm Branches. Ultrastructural and Micromechanical Examinations. J. Plant Growth Regul. 23: 76–82



- Burgert, I., Eder, M., Gierlinger, N. & Fratzl, P. (2007): Tensile and compressive stresses in tracheids are induced by swelling based on geometrical constraints of the wood cell. *Planta* 226: 981–987
- Casperson, G. (1962): Über die Bildung der Zellwand beim Reaktionsholz. *Holztechnologie* 3: 217–223
- Casperson, G. & Zinsser, A. (1965): On the cell wall formation of reaction wood. III. Formation of cavities in compression wood of *Pinus sylvestris* L. *Holz Roh- Werkst.* 23: 49–55
- Cockrell, R. A. (1974): A comparison of latewood pits, fibril orientation and shrinkage of normal and compression wood of giant sequoia. *Wood Sci. Technol.* 8: 197–206
- Côté, W. A. & Day, A. C. (1965): Anatomy and Ultrastructure of Reaction Wood. In: Côté, W. A. (Ed.), *Cellular Ultrastructure of Woody Plants*, Syracuse Univ. Press, Syracuse, New York
- DIN EN 1611-1, Ausgabe: 2002-11: Schnittholz – Sortierung nach dem Aussehen von Nadelholz .Teil 1: Europäische Fichten, Tannen, Kiefern, Douglasie und Lärchen. Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 1927-1: Ausgabe: 2008-06: Qualitäts-Sortierung von Nadel-Rundholz. Teil 1: Fichten und Tannen. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 4074-1, Ausgabe: 2012-06: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 1: Nadelschnittholz. Beuth Verlag, Berlin
- Donaldson, L. A., Singh, A. P., Yoshinaga, A. & Takabe, K. (1999): Lignin distribution in mild compression wood of *Pinus radiata*. *Can. J. Bot.* 77(1): 41–50
- Donaldson, L. A. & Turner, J. C. P. (2001): The influence of compression wood and microfibril angle on the occurrence of distortion in window frames made from radiata pine (*Pinus radiata*). *Holz Roh- Werkst.* 59: 163–168
- Donaldson, L. A., Grace, J. & Downes, G. M. (2004): Within-tree variation in anatomical properties of compression wood in radiata pine. *IAWA J.* 25(3): 253–271
- Douek, M. & Goring, D. A. I. (1976): Microscopic studies on the peroxide bleaching of Douglas fir wood. *Wood Sci. Technol.* 10: 29–38
- Du Toita, A. J. (1963): A study of the influence of compression wood on the warping of *Pinus radiata* D. Don timber. *S. African Forestry J.* 44(1): 11–15
- Färber, J., Lichtenegger, H. C., Reiterer, A., Stanzl-Tschegg, S. & Fratzl, P. (2001): Cellulose microfibril angles in a spruce branch and mechanical implications. *J. Mat. Sci.* 36: 5087–5092
- Fengel, D. & Stoll, M. (1973): Über die Veränderungen des Zellquerschnittes, der Dicke der Zellwand und der Wandschichten von Fichtenholz-Tracheiden innerhalb eines Jahresringes. *Holzforschung* 27: 1-7
- Fengel, D. & Wegener, G. (2003): *Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. De Gruyter, Berlin
- Fergus, B. J., Procter, A. R., Scott, J. A. N. & Goring, D. A. I. (1969): The distribution of lignin in sprucewood as determined by ultraviolet microcopy. *Wood Sci. Technol.* 3: 117–138

- Fournier, M., Baillères, H. & Chanson, B. (1994): Tree biomechanics: growth, cumulative prestresses and reorientations. *Biomimetics* 2: 229–251
- Gindl, W. (2002): Comparing mechanical properties of normal and compression wood in Norway spruce: the role of lignin in compression parallel to the grain. *Holzforschung* 56: 395–401
- Gindl, W., Gupta, H. S., Schöberl, T., Lichtenegger, H. C. & Fratzl, P. (2004): Mechanical properties of spruce wood cell walls by nanoindentation. *Appl. Phys. A* 79: 2069–2073
- Hafrén, J., Fujino, T. & Itoh, T. (1999): Changes in cell wall architecture of differentiating tracheids of *Pinus thunbergii* during lignification. *Plant Cell Physiol.* 40: 532–541
- Hartig, R. (1896): Das Rotholz der Fichte. *Forstlich-naturwissenschaftliche Zeitschrift* 5(4): 157–169
- Höster, H. R., Liese, W. (1966): Über das Vorkommen von Reaktionsgewebe in Wurzeln und Ästen der Dikotyledonen. *Holzforschung* 20: 80–90
- Jain, K. K. & Seth, M. K. (1980): Effect of bole inclination on ring width, tracheid length and specific gravity of wood at breast height in blue pine. *Holzforschung* 34: 52–60
- Keckes, J., Burgert, I., Frühmann, K., Müller, M., Kölln, K., Hamilton, M., Burghammer, M., Roth, S., Stanzl-Tschegg, S. & Fratzl, P. (2003): Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. *Nature Mat.* 2: 810–814
- Knigge, W. (1958): Das Phänomen der Reaktionsholzbildung und seine Bedeutung für die Holzverwendung. *Forstarchiv* 29: 4-10
- Köhler, L. & Spatz, H.-C. (2002): Micromechanics of plant tissues beyond the linear-elastic range. *Planta* 215: 33–40
- Kollmann, F. (1951): *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Bd.1. Springer Verlag
- Mäkinen, H., Saranpää, P. & Linder, S. (2002): Effect of Growth Rate on Fibre Characteristics in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holzforschung* 56: 449–460
- Mark, R. E. (1967): *Cell Wall Mechanics of Tracheids*. Yale University Press, New Haven
- Meylan, B. A. (1972): The influence of microfibril angle on the longitudinal shrinkage-moisture content relationship. *Wood Sci. Technol.* 6(4): 293–301
- Münch, E. (1938): Statik und Dynamik des schraubigen Baues der Zellwand, besonders des Druck- und Zugholzes. *Flora* 32: 357–424
- Navi, P., Rastogi, P. K., Gresse, V. & Tolou, A. (1995): Micromechanics of wood subjected to axial tension. *Wood Sci. Technol.* 29: 411–429
- Nyström, J. & Hagman, O. (1999): Real-time spectral classification of compression wood in *Picea abies*. *J. Wood Sci.* 45: 30–37
- Ormarsson, S. (1999): Numerical analysis of Moisture-Related Distortions in Sawn Timber. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg

- Reiterer, A., Lichtenegger, H., Tschegg, S. & Fratzl, P. (1999): Experimental evidence of a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls. *Phil. Mag. A* 79: 2173–2184
- Roffael, E., Essiamah, S., Díaz-Vaz Olmedo, J. E., Schneider, T., Dix, B. (2005): Untersuchungen über den Einfluss von Reaktionsholz (Druckholz) und Normalholz der Fichte auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF). *Forstarchiv* 76(6): 206-214
- Rosenthal, M. (2009): Entwicklung eines biologisch inspirierten, dreidimensional verformbaren Furniers aus Druckholz. Dissertation, TU Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-22891>
- Rothe, G. (1930): Druckfestigkeit und Druckelastizität des Rot- und Weißholzes der Fichte. *Thar. Forstl. Jahrb.* 81: 204–231
- Ruel, K., Burlat, V. & Joseleau, J. P. (1999): Relationship between ultrastructural topochemistry of lignin and wood properties. *IAWA J.* 20: 203–211
- Sarén, M. P., Serimaa, R., Andersson, S., Saranpää, P., Keckes, J. & Fratzl, P. (2004): Effect of growth rate on mean microfibril angle and cross-sectional shape of tracheids of Norway spruce. *Trees* 18: 354–362
- Schmidt-Vogt, H. (1986): Die Fichte II/1. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin
- Schulz, H., Bellmann, B., Wagner, L. (1984): Druckholzanalyse in einem stark verkrümmten Fichtenbrett. *Holz Roh- Werkst.* 42(3) : 109
- Schultze-Dewitz, G., Götze, B. & Luthardt, H. (1971): Eigenschaften und Verwertung des Astholzes von Kiefer. *Holztechnologie* 12: 214–221
- Schwerin, G. (1958): The chemistry of reaction wood. II. The polysaccharides of *Eucalyptus gonicalyx* and *Pinus radiata*. *Holzforschung* 12: 43–48
- Sedighi-Gilani, M., Sunderland, H. & Navi, P. (2005): Microfibril angle non-uniformities within normal and compression wood tracheids. *Wood Sci. Technol.* 39: 419–430
- Seeling, U. (1999): Einfluss von Richtgewebe ("Druckholz") auf Festigkeit und Elastizität des Fichtenholzes. *Holz Roh- Werkst.* 57: 81–91
- Seth, M. K. & Jain, K. K. (1977): Relationship between percentage of compression wood and tracheid length in blue pine (*Pinus wallichiana* A. B. Jackson). *Holzforschung* 31: 80–83
- Seth, M. K. (1981): Variation in tracheid length in blue pine (*Pinus wallichiana* A. B. Jackson). II. Radial pattern of variation in tracheid length in the first-formed earlywood from pith to bark. *Wood Sci. Technol.* 15: 275–286
- Singh, A. P., Kim, Y. S., Park, B. D., Chung, G. C. & Wong, A. H. H. (2003): Presence of a distinct S3 layer in mild compression wood tracheids of *Pinus radiata*. *Holzforschung* 57: 243–247
- Shelbourne, C. J. A. & Ritchie, K. S. (1968): Relationship between degree of compression wood development and specific gravity and tracheid characteristics in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Holzforschung* 22: 185–190

- Sonntag, P. (1909): Die duktilen Pflanzenfasern, der Bau ihrer mechanischen Zellen und die etwaigen Ursachen ihrer Duktilität. *Flora* 99: 203–259
- Spatz, H.-C., Köhler, L. & Niklas, K. J. (1999): Mechanical behaviour of plant tissues: composite materials or structures? *J. Exp. Biol.* 202: 3269–3272
- Takabe, K., Miyauchi, T. & Fukazawa, K. (1992): Cell wall formation of compression wood in todo fir (*Abies sachalinensis*) - I. Deposition of polysaccharides. *IAWA Bull.* 13(3)
- Timell, T. E. (1972a): Beobachtungen an Holzstrahlen im Druckholz. *Holz Roh- Werkst.* 30: 267–273
- Timell, T. E. (1972b): Nature of the last-formed tracheids in compression wood. *IAWA Bull.* (4): 10–19
- Timell, T. E. (1978a): Helical thickenings and helical cavities in normal and compression wood of *Taxus baccata*. *Wood Sci. Technol.* 12: 1–15
- Timell, T. E. (1978b): Ultrastructure of compression wood in *Ginkgo biloba*. *Wood Sci. Technol.* 12: 89–103
- Timell, T. E. (1982): Recent progress in the chemistry and topochemistry of compression wood. *Wood Sci. Technol.* 16: 83–122
- Timell, T. E. (1983): Origin and evolution of compression wood. *Holzforschung* 37: 1–10
- Timell, T. E. (1986): *Compression Wood in Gymnosperms*. 1, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio
- Trendelenburg, R. (1932): Über die Eigenschaften des Rot- oder Druckholzes der Nadelhölzer. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 108(1): 1–14
- Wagenführ, R. (1989): *Anatomie des Holzes unter besonderer Berücksichtigung der Holztechnik*. VEB Fachbuchverlag Leipzig
- Wagenführ, R. (1999): *Anatomie des Holzes*. DRW-Verlag
- Wagenführ, R. (2007): *Holzatlas*. Fachbuchverlag Leipzig
- Wardrop, A. B. (1965): The formation and function of reaction wood. In: Côté, W. A. (Ed.), *Cellular Ultrastructure of Woody Plants*, Syracuse Univ. Press, Syracuse, New York
- Wernsdörfer, H., Reck, P., Seeling, U., Becker, G. & Seifert, T. (2004): Erkennung und Messung des Reaktionsholzes bei Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) mittels Verfahren digitaler Bildanalyse. *Holz Roh- Werkst.* 62(4): 243–252
- Wooten, T. E., Barefoot, A. C. & Nicholas, D. D. (1967): The longitudinal shrinkage of compression wood. *Holzforschung* 21: 168–171
- Yamamoto, H. (1998): Generation mechanism of growth stresses in wood cell walls: roles of lignin deposition and cellulose microfibril during cell wall maturation. *Wood Sci Technol* 32: 171–182
- Yang, J. L. & Evans, R. (2003): Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz Roh- Werkst.* 61: 449–452



Yoshizawa, N., Satoh, I., Yokota, S. & Idei, T. (1992): Response of differentiating tracheids to stem inclination in young trees of *Taxus cuspidata*. IAWA Bull. 13(2): 187–194

-----

Zum Thema Holzanatomie sind bereits folgende Beiträge erschienen:

- Holzaufbau und Tränkbarkeit. Holz-Zentralblatt, 136. Jg, Nr. 34, S. 852, 854
- Der Zellwandbau von Nadelholztracheiden. Holz-Zentralblatt, 138. Jg., Nr. 1, S. 10, 11
- Zur Anatomie des Fichtenholzes. Holz-Zentralblatt, 138. Jg., Nr. 17, S. 451, 452

Die Beiträge sind im Internet abrufbar unter: [www.gucosa.de](http://www.gucosa.de)