

Bauingenieurwissenschaften – Bachelor, Skript zur Vorlesung

## Werkstoffe I

### Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Prof. Dr. Ingo Burgert, ETH Zürich, IfB

Das Skript „Werkstoffe I, Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe“ behandelt den Vorlesungsstoff der vierten bis sechsten Doppelstunde der Vorlesung Werkstoffe I im Studiengang Bauingenieurwissenschaften der ETH Zürich. Das Skript baut auf das vormalige und gleichnamige Vorlesungsskript von Prof. Dr. Peter Niemz auf, aus dem Teile übernommen wurden. Ferner wurde zur Erstellung des Skripts hauptsächlich auf folgende Lehrbücher zurückgegriffen:

Niemz P (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW-Verlag, Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen

Dunky M, Niemz P (2002) Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren, Springer, Heidelberg

Wagenführ A, Scholz D (Hrsg.) (2012) Taschenbuch der Holztechnik (2. Auflage), Hanser Verlag

Grosser D (1977) Die Hölzer Mitteleuropas, Springer, Heidelberg

Raven PH, Evert RF, Curtis H (1988) Biologie der Pflanzen (2. Auflage), de Gruyter, Berlin

Mein Dank gilt Frau Silvana Uttinger und Herrn Tobias Keplinger für die grosse Unterstützung bei der Erstellung des Skripts, meiner Frau Katja Geis-Burgert für den Satz und das Layout sowie Burgi Gierlinger, Markus Rüggeberg und Philipp Hass für kritisches Korrekturlesen.

# 1 Einführung

## 1.1 Holz und Wald

Holz ist einer der ältesten Werkstoffe, der in der Menschheitsgeschichte stets in einer grossen Vielzahl von Anwendungen genutzt wurde. Dies liegt zum einen an der generellen Verfügbarkeit dieser nachwachsenden Ressource, zum anderen an den guten Eigenschaften und der verhältnismässig leichten Bearbeitbarkeit.

Weltweit existieren ca. 3,5 Mrd. ha Wald, die grössten Anteile davon finden sich in Osteuropa und Südamerika. Nord- und Westeuropa besitzen gemeinsam nur etwa drei Prozent der weltweiten Waldfläche. Aber auch einige Staaten in Mitteleuropa wie die Schweiz oder Deutschland sind auf ihre Fläche bezogen typische „Waldländer“, besitzen beide doch auf gut einem Drittel ihrer Landesfläche Wald. Nutzbare Wälder gibt es in ganz Europa etwa 150 Mio Hektar (ohne Berücksichtigung von Russland). Dies entspricht einem nutzbaren Gesamtvorrat von 21,4 Milliarden m<sup>3</sup>. Jedes Jahr wachsen in diesem Gebiet 661 Mio. m<sup>3</sup> Holz zu (in Rinde), was zu einer Rundholzproduktion von etwa 327 Mio. Festmetern führt. Ein Grossteil dieser Produktion erfolgt in Schweden, Finnland, Frankreich und Deutschland.<sup>1</sup>

Die Schweiz verfügt über eine Fläche an nutzbaren Wäldern von ca. 1,25 Mio. ha, mit einem Holzvorrat von ca. 427 Mio m<sup>3</sup> (Schaftholz in Rinde). Der Zuwachs liegt bei ca. 10 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr. Für die Schweiz und viele andere Länder Europas gilt in der Forstwirtschaft schon lange der Grundsatz der Nachhaltigkeit (nicht mehr ernten als nachwächst), was eine Nutzung der Ressource Holz auch in der Zukunft garantiert. In der Schweiz beträgt die Holzernte pro Jahr nur ca. 5,1 Mio. m<sup>3</sup>. Damit wächst auch unter Einbeziehung der Mortalität jährlich mehr Holz nach als genutzt wird, so dass vor allem beim Laubholz ohne Verletzung des Nachhaltigkeitsprinzips mehr geerntet werden könnte.<sup>2</sup>

In den schweizerischen Wäldern finden sich ~12 Nadelbaumarten und über 40 Laubbauarten. Bei den Nadelbäumen überwiegen Fichte und Tanne während bei den Laubbäumen

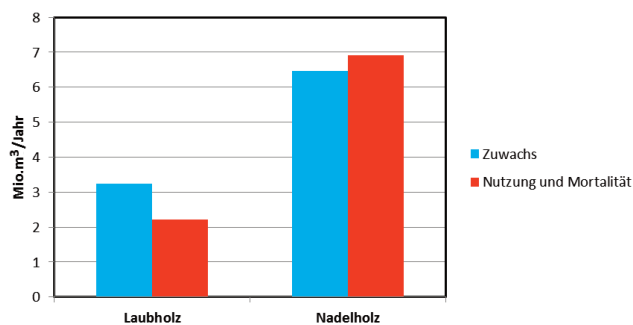


Abb. 1.1: Nachwachsende Ressource:  
Abbildungen Zuwachs-Verbrauch Schweiz  
(Angaben aus: Jahrbuch Wald und Holz 2011, BAFU)

Buche, Eiche und Esche dominieren. Insbesondere die Buche wird zunehmend zur beherrschenden Baumart, vor allem im Schweizer Mittelland. Abbildung 1.1 zeigt Zuwachs auf der einen sowie Nutzung und Mortalität auf der anderen Seite nach Nadel- und Laubbauarten aufgeschlüsselt. Deutlich wird die Diskrepanz zwischen Nutzung und Verbrauch beim Laubholz.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der nachwachsenden Ressource Holz ist neben der Verfügbarkeit die Speicherung von Kohlenstoff in Zeiten des Klimawandels. In einem Kubikmeter Holz sind durchschnittlich 255 kg Kohlenstoff gespeichert, was einem CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 0,935 Tonnen entspricht. Die CO<sub>2</sub>-Speicherung beträgt im Nadelwald 157 t/ha pro Jahr. Mit Ausnahme der Jahre 2000–2002, in denen viel Holz aufgrund von Sturmereignissen geerntet werden musste, wird der Nettosenkeneffekt des Schweizer Waldes deutlich (Abbildung 1.2).

Die stoffliche Verwendung von Holz oder Holzprodukten trägt also erheblich zur langfristigen Kohlenstoffspeicherung bei und hilft, die Ziele der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen zu erreichen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Energiebilanz ist der Energieverbrauch im Produktionsprozess.

<sup>1</sup>Zahlen: Forest Resources of Europe, UN ECE/FAO 2000, Main Report

<sup>2</sup>Zahlen: Jahrbuch Wald und Holz (2011), Bundesamt für Umwelt

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

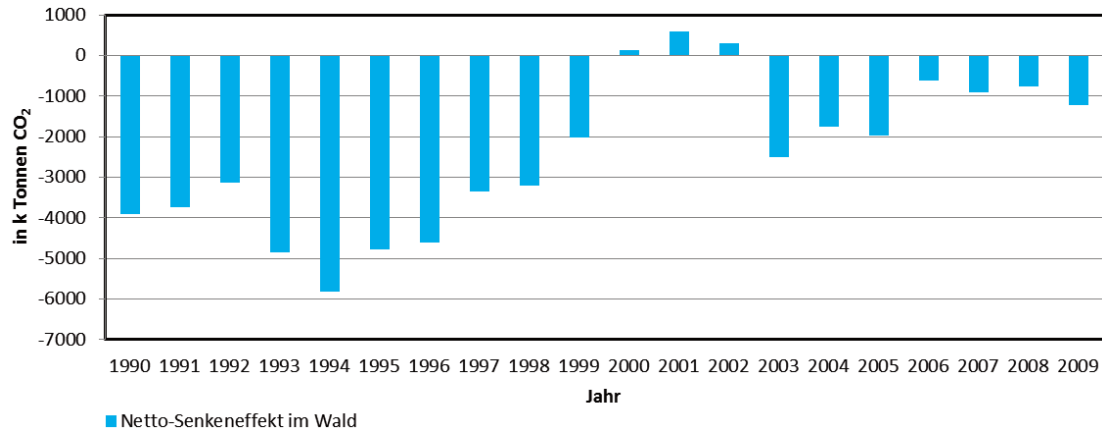


Abb. 1.2: Jährlicher Nettosenkeneffekt (Angaben aus: Jahrbuch Wald und Holz 2011, BAFU)

Vergleicht man den mittleren Energieverbrauch, um eine gleiche Menge Werkstoff zu produzieren, haben z. B. Produkte aus Aluminium einen um 70-fach höheren Wert als Holz (Abbildung 1.3). Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass durch die abweichenden Materialeigenschaften meist deutlich weniger Material an Aluminium oder Stahl benötigt wird, um die gleichen mechanischen Anforderungen zu erfüllen.

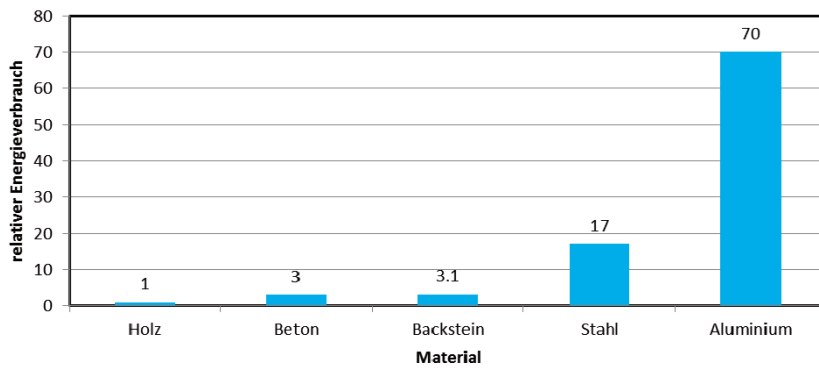


Abb. 1.3: Mittlerer relativer Energieverbrauch (Holz = 1) ausgewählter Rohstoffe zur Herstellung pro Tonne Fertigprodukt (Quellen: Corrim Report 1976; Koch 1991)

### 1.2 Holzverwendung – Bauwesen

Die gesamte Holzernte der Schweiz betrug im Jahr 2010 ca. 5,1 Mio m<sup>3</sup>, wobei ca. 3,5 Mio m<sup>3</sup> auf Nadelholz und ca. 1,6 Mio m<sup>3</sup> auf Laubholz entfielen. Abbildung 1.4 zeigt sehr deutlich, dass sich die Art der Nutzung deutlich unterscheidet. Während beim Nadelholz der Stammholzanteil überwiegt, wird Laubholz überwiegend als Energieholz genutzt.

Ökologisch gesehen ist das Heizen mit Holz durchaus als sinnvoll anzusehen, da Holz ausschliesslich aus gespeicherter „sauberer“ Sonnenenergie besteht, die zur Wärmeabgabe wieder freigesetzt wird und dessen verbrauchte Biomasse im Unterschied zu fossilen Energieträgern wieder nachwächst. Allerdings ist eine möglichst lange vorausgehende stoffliche Nutzung anzustreben, wie sie durch eine Kaskadennutzung erreicht werden kann.

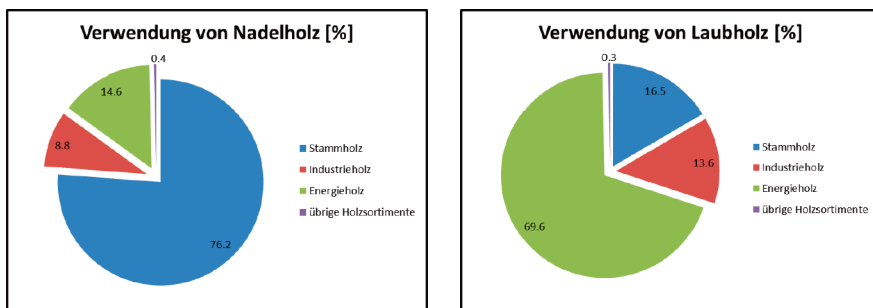


Abb. 1.4: Holzverwendung Schweiz (Quelle: nach Schweizerische Forststatistik, Bundesamt für Statistik (BFS))

Die Verwendung von Holz im Bauwesen hat eine lange Tradition und obwohl Holz als nicht sehr dauerhaft gilt, sind Bauwerke wie die Horyuji Pagode von Nara, Japan erhalten, die im frühen siebten Jahrhundert erbaut wurde (siehe Abbildung 1.5). Im modernen Holzbau der Schweiz werden zunehmend mehrgeschossige Bauten und Konstruktionen mit grossen Spannweiten realisiert. Im Holzbau werden bei den Nadelhölzern überwiegend

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie und Lärche genutzt, bei den Laubhölzern sind es Eiche, Buche und Esche mit steigender Tendenz, aufgrund des angesprochenen Umbaus der Wälder in den letzten Jahren.



Abb. 1.5: (a) Horyuji Pagode in Nara, Japan; (b) erstes sechsgeschossiges Holzhaus der Schweiz in Steinhausen (Gesamtleitung Renggli AG, Sursee, 2006)

Seit ein paar Jahren verzeichnet der Holzverbrauch im Bauwesen deutliche Zuwachsraten, gleichwohl er prozentual gesehen immer noch einen geringen Anteil im Vergleich zu anderen Baustoffen aufweist und die Konkurrenz durch andere Baumaterialien gross ist. Eine Reihe von Gründen sprechen für den vermehrten Einsatz von Holz, so u. a. die Nutzung einer nachwachsenden Ressource, die guten mechanischen Eigenschaften bei einer geringen Dichte, die Ästhetik des Werkstoffs oder der vergleichsweise geringe Energieaufwand bei der Verarbeitung. Allerdings stehen diesen Argumenten für das Holz auch nachteilige Eigenschaften gegenüber, deren Überwindung Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten ist. Hier sind vor allem die Variabilität der Eigenschaften, die geringe Dimensionsstabilität, Dauerhaftigkeit und UV Stabilität sowie die Brennbarkeit des Holzes zu nennen. Neben Holzmodifikationen, die diese Nachteile zumindest teilweise kompensieren können, ist die „kenntnisreiche Holzverwendung“ ein wesentlicher Faktor, d.h. Bauen mit Holz mit dem umfänglichen Wissen seiner Grenzen und Potentiale. Alleine deren Berücksichtigung (z. B. durch konstruktiven Holzschutz) ermöglicht es, verschiedene materialspezifische Probleme im Holzbau von vornerein zu vermeiden. Die folgenden Kapitel sollen Ihnen die notwendigen Grundlagen über das spezielle Eigenschaftsprofil des Holzes vermitteln.

## 2 Aufbau des Holzes

### 2.1 Holz als biologisches Material

Holz ist ein Naturprodukt und daher in erster Linie auf die Anforderungen des Baumes bezüglich Stabilität und Wasserleitung angepasst. Bäume haben mit diesem optimierten Biomaterial erstaunliche Eigenschaften generiert. Sie können ihr Wachstum nicht nur an veränderliche Umgebungsbedingungen anpassen, sondern sie sind auch Halter einiger beeindruckender Rekorde. So können Bäume über 100 m hoch wachsen und über 6000 Jahre alt werden. Abbildung 2.1 zeigt einen Vertreter dieser sehr alten Kiefern-Bäume (*Pinus longaeva*).

Die angesprochene Optimierung der Struktur durch den Baum spiegelt sich im hierarchischen Aufbau des Holzes wider (Abbildung 2.2). Es werden fünf Hierarchieebenen un-

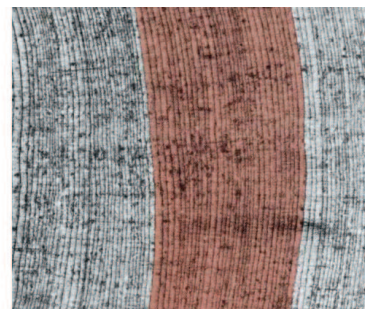


Abb. 2.1 Kiefer (*Pinus longaeva*) im Osten Kaliforniens. Farblich markierter Bereich zeigt den Holzuwachs in den Jahren 4240 - 4210 v. Chr. (aus: Raven et al. (1988) *Biologie der Pflanzen*)

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

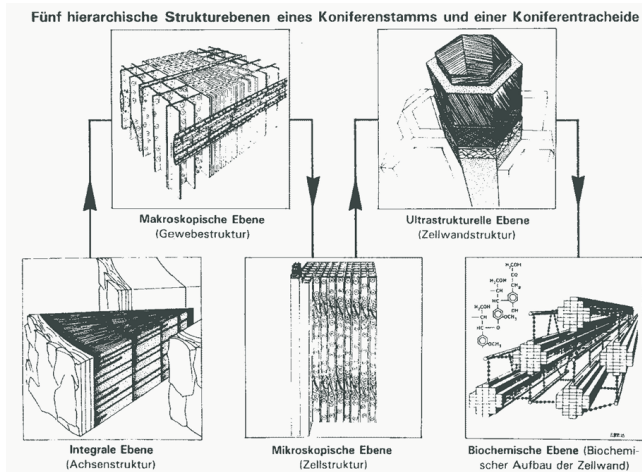


Abb. 2.2: Hierarchischer Aufbau des Holzes am Beispiel von fünf Hierarchieebenen eines Nadelbaums (aus: Speck et al. (1996) BiONA Report 10)

terschieden, von der integralen Ebene des Stammes, über die makroskopische Ebene der Gewebe, der mikroskopischen Ebene der Zellen und der ultrastrukturellen Ebene des Zellwandaufbaus hin zur biochemischen Ebene der Zellwandpolymere. Entscheidend ist, dass Struktur, Chemismus und mechanische Eigenschaften auf der ultrastrukturellen und biochemischen Ebene eine grosse Bedeutung für das makroskopische Verhalten des Holzes haben.

Im Unterschied zu vielen anderen mehrjährigen Pflanzen wachsen Bäume jedes Jahr nicht nur in die Höhe, sondern auch in die Breite (sekundäres Dickenwachstum). Ein Ring aus lebenden, teilungsfähigen Zellen, das sogenannte Kambium, befindet sich direkt unter der Baumrinde und ist für dieses Dickenwachstum verantwortlich. Nach innen bilden die Kambiumzellen Holzzellen (Xylem), nach aussen Bastzellen (Phloem). Im Holz wird Wasser von der Wurzel zur Krone transportiert, im Phloem ist die Haupttransportrichtung für die Photosyntheseprodukte (Zucker) von der Krone abwärts.

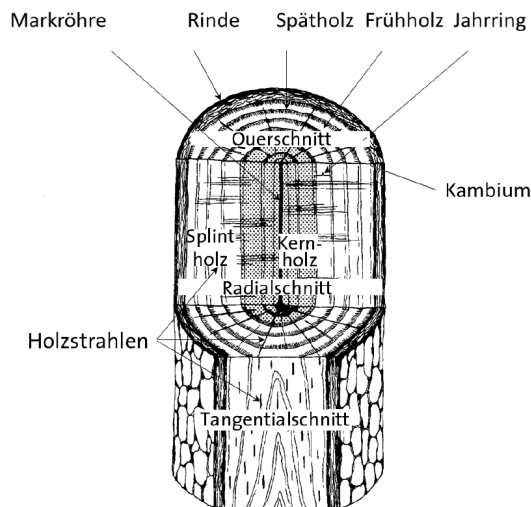


Abb. 2.3: Die drei Schnittbenen des Holzes und die wichtigsten Strukturelemente am Beispiel eines Nadelholzstammsegments

Bei der Betrachtung des Holzes werden drei Schnittbenen unterschieden, die jeweils unterschiedliche charakteristische Aspekte des dreidimensionalen Holzkörpers aufzeigen. Nur eine Kombination aller drei Ebenen führt zu einem vollständigen Bild der jeweiligen Holzstruktur. Auch für die Beurteilung und Bestimmung von Holzeigenschaften ist die Einteilung in diese verschiedenen Schnittrichtungen von Bedeutung. Abbildung 2.3 zeigt in einer schematischen Darstellung den Aufbau des Stammes.

siehe: 3.1 Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften

**Querschnitt:** Der Querschnitt eines Baumstammes hat im Idealfall eine annähernd kreisrunde Form. Der ältere vom jüngeren Baum gebildete Holzteil befindet sich im Inneren (juveniles Holz), der jüngere vom alten Baum gebildete Holzteil aussen (adultes Holz). Zentral liegt die Markröhre, welche vor dem Beginn des sekundären Dickenwachstums gebildet wird. Die einzelnen Jahrringe des Baumes sind mit blossen Auge als konzentrische Ringe zu erkennen. Der Querschnitt weist eine netzförmige Textur auf, da das dominierende axiale Gewebe von Holzstrahlen durchquert wird, die ähnlich wie Speichen eines Rades von innen nach aussen über die Jahrringgrenzen hinweg verlaufen.

**Radialschnitt:** Diese Schnittebene entsteht, wenn man ein Stammsegment von der Mitte her wie eine Torte aufteilt, im einfachsten Falle also in der Mitte von Markröhre bis Rinde durchtrennt. Der Radialschnitt zeigt das Kreuzen der axialen und radialen Gewebe. Die Holzstrahlen verlaufen in horizontaler Richtung.

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

**Tangentialschnitt:** Dieser entsteht, wenn ein Längsschnitt im äusseren Bereich des Stammsegments vorgenommen wird. Die einzelnen Jahrringe sind nicht mehr so leicht zu erkennen, da sie nun unregelmässig „fladerig“ in Erscheinung treten. Typisch für diese Schnittebene ist, dass die radial verlaufenden Holzstrahlen nun im Anschnitt zu sehen sind. Je nach Breite der Holzstrahlen kann man in Längsrichtung verlaufende Streifen oder Spindeln erkennen.

### 2.2 Wachstumsdynamik

Das Dickenwachstum eines Baumes wird von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst, woraus sich eine grosse natürliche Variabilität des Holzes ergibt. Dies bezieht sich auf Unterschiede zwischen Baumarten, innerhalb einer Baumart, innerhalb eines Stammes und sogar zwischen einzelnen Gewebe- und Zelltypen. Wichtige Faktoren sind beispielsweise die genetischen Unterschiede zwischen den Bäumen, umweltbedingte Faktoren wie das Klima oder mechanische Beanspruchungen (z. B. Wind).

Diese Zusammenhänge lassen sich sehr gut anhand des Einflusses des Klimas aufzeigen. Bäume werden in ihrem Wachstum stark von Temperatur, Wasserversorgung, Nährstoffversorgung und Tageslänge beeinflusst. Daher bilden die Bäume in unseren Breiten die bekannten Jahrringe, die das Resultat des periodischen Wachstums sind, mit einer Wachstumspause in den Wintermonaten. In Zonen ohne Jahreszeitenrhythmus, wie in den Tropen, sind keine Jahrringe im Holz zu erkennen. Trotzdem kann man auch in den Hölzern tropischer Gebiete Zuwachszonen zuordnen, wenn zum Beispiel regelmässige Trockenperioden das Dickenwachstum beeinflussen.

Innerhalb eines Jahrrings lassen sich meist hellere Bereiche zu Beginn und dunklere, dichtere Bereiche am Ende des Jahrrings unterscheiden. Der Grund dafür ist, dass Bäume zu Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr ein Holz bilden, welches für die Wasserleitung optimiert ist, das sogenannte Frühholz. Im Spätsommer investieren Bäume dann stärker in die mechanische Stabilität und bilden ein dichteres Holz, das sogenannte Spätholz. Diese Wachstumsdynamik, mit einer Variation von Jahrringbreiten und Anteilen von Frühholz und Spätholz, ist ein dominanter Faktor für die natürliche Variabilität des Holzes, welche sich unmittelbar in einer grossen Variabilität der Holzeigenschaften niederschlägt.

siehe: 3.5.2 Variabilität der Festigkeit

Die Wachstumsdynamik gilt sowohl für Nadelhölzer als auch für Laubhölzer, obgleich die Optimierungen hinsichtlich Wassertransport und Festigkeit auf sehr unterschiedliche Weise erreicht werden. Der Grund dafür ist, dass Nadelhölzer evolutiv deutlich älter als Laubbäume sind und es im Laufe der Evolution zu einer Funktionsoptimierung des Holzaufbaus gekommen ist. Daher haben Nadelhölzer einen relativ einfachen Aufbau der Holzstruktur, während Laubhölzer deutlich differenzierter und komplexer sind.

### 2.3 Nadelholz

Abbildung 2.4 zeigt in einer schematischen Darstellung den Aufbau des Nadelholzes. Neben den axial ausgerichteten Früh- und Spätholzzellen sind die radial verlaufenden einreihigen Holzstrahlen und die axial verlaufenden Harzkanäle zu erkennen.

Nadelhölzer bestehen aus zwei Zelltypen, zu ca. 90 % aus sogenannten Tracheiden und zu ca. 10 % aus sogenannten Parenchymzellen, welche überwiegend in den Holzstrahlen zu finden sind. Tracheiden sind ca. 3 mm lang, bei einem Durchmesser von ca. 30 µm (Abbildung 2.5). Die Tracheiden sterben schon bald nach ihrer Entstehung ab, wodurch eine Struktur wie die einer Hohlfaser (prosenchymatische Zelle) zurückbleibt. Tracheiden sind fast ausschliesslich in Längsrichtung des Stammes oder der Äste orientiert, aber es gibt neben den Längstracheiden in einigen Baumarten auch Quertracheiden. Sie befinden sich an den oberen oder unteren Enden der Holzstrahlen.

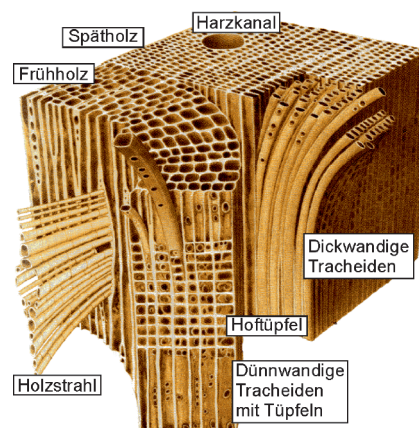


Abb. 2.4: 3D-Struktur Nadelholz  
(nach: Bramwell (1976))

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

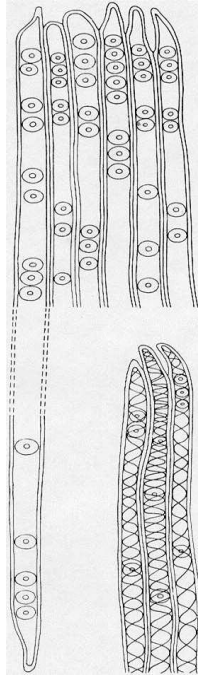


Abb. 2.5: Struktur von Tracheiden mit Tüpfeln (aus: Grosser (1977))

Tracheiden sind im Frühholz weitlumig und haben eine dünne Zellwand, während sie im Spätholz englumig und dickwandig sind. Auf diese Weise kann dieser eine Zelltyp sowohl die Funktion der Wasserleitung als auch die Funktion der Festigung übernehmen. Die Art des Übergangs von Frühholz zu Spätholz im Jahrring, d.h. der Wechsel von Frühholztracheiden zu Spätholztracheiden, ist ein wichtiges Merkmal um Nadelhölzer zu unterscheiden (Abbildung 2.6).

Der Wassertransport zwischen Tracheiden wird über sogenannte Hoftüpfel gewährleistet (siehe auch Abbildung 2.5). Sie besitzen einen auf Druckunterschiede reagierenden Schliessmechanismus und bilden damit einen wichtigen Schutzmechanismus. Ein Verschlussplättchen (Torus) ist im Tüpfelinneren (Porus) an aus Zellulose bestehenden Mar-

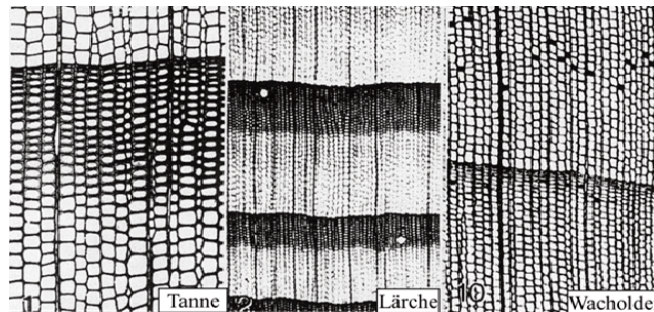


Abb. 2.6: Charakteristische Übergänge von Frühholz zu Spätholz in Tanne, Lärche und Wacholder (aus: Grosser (1977))

gofäden aufgehängt. Kommt es zu einem Luftenbruch in das Wasserleitsystem wird der Torus durch den entstehenden Unterdruck auf den Porus gezogen und verschliesst so die Zellverbindung (Abbildung 2.7).

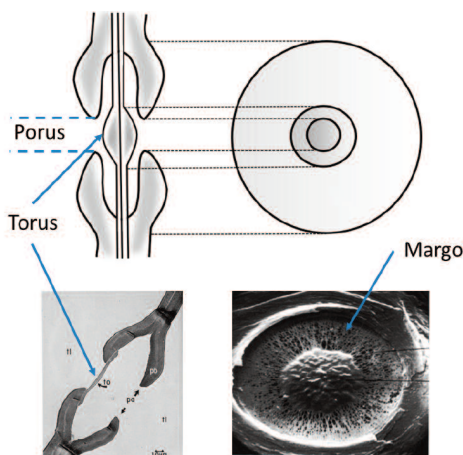
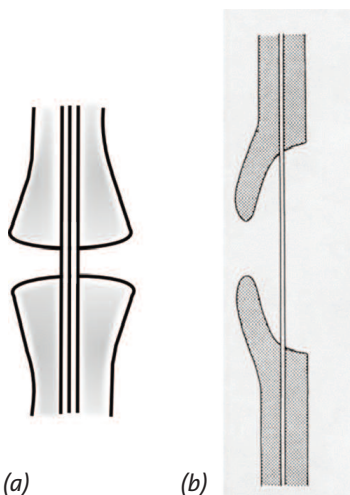


Abb. 2.7: Hoftüpfel zwischen 2 Tracheiden (Elektronenmikroskopische Aufnahmen aus: Core et al. (1979); Raven et al. (1988))

Im Vergleich zu Tracheiden sind Parenchymzellen (parenchymatische Zellen) relativ kleine Zellen, mit einer Backstein ähnlichen Form. Sie sind im Splintholz stets lebend und haben die Hauptaufgaben der Speicherung und Mobilisierung von Reservestoffen. Zudem spielen sie eine wichtige Rolle bei der Verkernung und bei Wundreaktionen. Die Länge der Parenchymzellen ist meist deutlich geringer als die der Tracheiden. Parenchymzellen bilden vornehmlich die Holzstrahlen, aber es gibt auch Nadelholzbaumarten mit Axialparenchym. Ein spezieller Typ sind die sogenannten Epithelzellen, welche zu den Harzkanälen gehören und in der Lage sind, Harz auszuscheiden. Die lebenden Parenchymzellen sind untereinander mit einfachen Tüpfeln verbunden (Abbildung 2.8 a). Zwischen Parenchymzellen und Tracheiden existieren ebenfalls Tüpfelverbindungen, die eine besondere Form haben können und als wichtiges Bestimmungsmerkmal bei der Unterscheidung von Nadelhölzern in der Lichtmikroskopie dienen (Abbildung 2.8 b).



Da die Hoftüpfel nach der Fällung des Baumes zu meist irreversibel verschlossen werden, stellen die Tüpfelübergänge zwischen Holzstrahlparenchymzellen und Tracheiden die einzigen offenen Transportwege im geernteten Holz dar.

siehe: 2.5 Splintholz und Kernholz, 4 Holzschutz

Abb. 2.8: (a) Einfache Tüpfel zwischen 2 Parenchymzellen; (b) Tüpfel zwischen Tracheide und Parenchymzelle (nach: Grosser (1977))



## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### 2.4 Laubholz

Abbildung 2.9 zeigt in einer schematischen Darstellung den Aufbau des Laubholzes. Auch hier ist eine Struktur mit axial ausgerichteten Zellen und radial verlaufenden, in diesem Fall mehrreihigen Holzstrahlen zu erkennen. Es ist aber direkt offensichtlich, dass das Laubholz deutlich komplexer als das Nadelholz ist.

Im Gegensatz zum Nadelholz gibt es beim Laubholz viele verschiedene Zelltypen und damit eine Arbeitsteilung (Abbildung 2.10). Das axiale Festigungsgewebe besteht aus Fasern. Je nach Entwicklungstyp handelt sich um Librifasern oder Fasertracheiden, wobei in einer Holzart auch mehrere Fasertypen vorkommen können. Der am weitesten differenzierte Fasertyp ist die Librifaser, welche ausschliesslich für die Festigkeit zuständig ist, während Fasertracheiden, wie am Namen erkennbar, funktionell der Nadelholztracheide noch sehr ähnlich sind.

Ein weitere wichtiger Gegensatz zum Nadelholz ist, dass Laubhölzer über einen speziellen Zelltyp verfügen, der ausschliesslich für die Wasserleitung verantwortlich ist. Diese axial verlaufenden Zellen werden Gefässe genannt und besitzen einen deutlich grösseren Durchmesser als die Fasern des Grundgewebes, so dass sie teilweise schon mit blossen Auge, auf jeden Fall aber mit der Lupe, erkennbar sind. Der Hauptteil der Wasserleitung erfolgt in diesen Gefässen, welche mehrere Meter lang werden können. Sie bestehen aus einer Vielzahl von einzelnen Zellen, den sogenannten Gefässgliedern, welche sich nach der Bildung durch das Kambium noch sehr stark lateral geweitet haben. Zur Bildung der Röhrenstruktur der Gefässe werden die Querwände zwischen den Zellen entweder komplett aufgelöst (einfache Gefässdurchbrechung) oder bleiben teilweise als leiterförmige Gefässdurchbrechung erhalten, so dass das Wasser sehr schnell transportiert werden kann. Zusätzlich gibt es einen horizontalen Wassertransport über intervaskuläre Tüpfel. Die Gefässglieder besitzen eine recht dünne Zellwand und sind wie die Fasern bei Beginn ihrer Funktionserfüllung bereits tot. Wie bei den Festigungsgeweben gibt es auch bei der Wasserleitung in Form von vaskulären Tracheiden noch Zelltypen im Laubholz, welche die funktionelle Ähnlichkeit zur Frühholztracheide erkennen lassen.

Man unterteilt die Laubhölzer je nach Grösse und Anordnung der Gefässe in zwei Hauptgruppen; Zerstreuporer und Ringporer mit einem Zwischentyp, den sogenannten Halbringporern (Abbildung 2.11). Die Zerstreuporer (z. B. Buche, Ahorn, Birke) besitzen mittelgrosse Gefässe, die über den gesamten Jahrring annähernd gleichmässig verteilt sind und in ihrem Durchmesser weitgehend konstant bleiben. Die Ringporer (z. B. Eiche, Ulme, Robinie, Esche oder Edelkastanie) besitzen im Frühholz sehr grosse Gefässe, die einen Durchmesser von über einem halben Millimeter erreichen können. Die grossen Durchmesser der Frühholzgefässe haben den Vorteil, sehr viel mehr Wasser in deutlich kürzerer Zeit zu leiten, bergen aber auch das Risiko eines Zusammenbruchs der Wasserleitungen auf Grund von Wassermangel oder Lufteinbruch. Im Spätholz des Jahrrings treten nur noch spärlich einige kleine bis mittelgrosse Gefässe auf. Strukturell ergibt sich deshalb im Querschnitt ein deutlich sichtbarer Ring aus Frühholzporen, der für diese Holzartengruppe

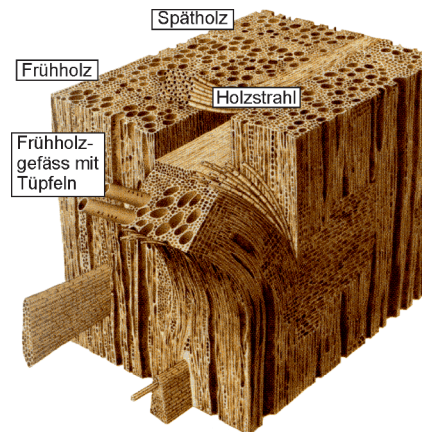


Abb. 2.9: 3D-Struktur Laubholz (nach: Bramwell (1976))

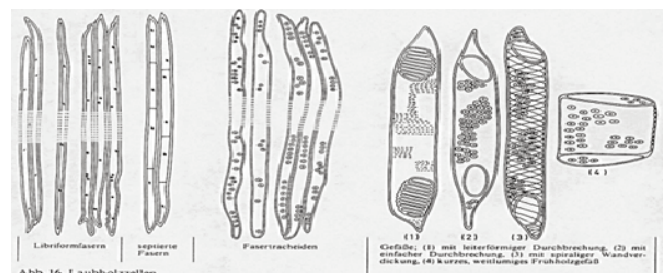


Abb. 2.10: Zelltypen des Laubholzes; Librifasern, Fasertracheiden, Gefässglieder (aus: Grosser (1977))

Man unterteilt die Laubhölzer je nach Grösse und Anordnung der Gefässe in zwei Hauptgruppen; Zerstreuporer und Ringporer mit einem Zwischentyp, den sogenannten Halbringporern (Abbildung 2.11). Die Zerstreuporer (z. B. Buche, Ahorn, Birke) besitzen mittelgrosse Gefässe, die über den gesamten Jahrring annähernd gleichmässig verteilt sind und in ihrem Durchmesser weitgehend konstant bleiben. Die Ringporer (z. B. Eiche, Ulme, Robinie, Esche oder Edelkastanie) besitzen im Frühholz sehr grosse Gefässe, die einen Durchmesser von über einem halben Millimeter erreichen können. Die grossen Durchmesser der Frühholzgefässe haben den Vorteil, sehr viel mehr Wasser in deutlich kürzerer Zeit zu leiten, bergen aber auch das Risiko eines Zusammenbruchs der Wasserleitungen auf Grund von Wassermangel oder Lufteinbruch. Im Spätholz des Jahrrings treten nur noch spärlich einige kleine bis mittelgrosse Gefässe auf. Strukturell ergibt sich deshalb im Querschnitt ein deutlich sichtbarer Ring aus Frühholzporen, der für diese Holzartengruppe

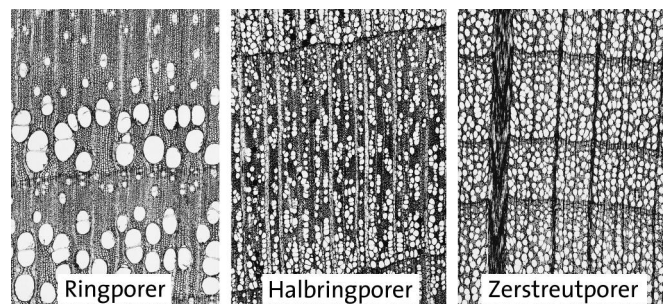


Abb. 2.11: Porigkeit des Laubholzes (Esche, Kirsche und Buche) (aus: Grosser (1977))

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

namensgebend ist. Bei Halbringporern (z. B. Kirsche) nimmt entweder der Durchmesser der Gefässe oder deren Anzahl vom Frühholz zum Spätholz ab.

Im Gegensatz zu den einreihigen Holzstrahlen der Nadelhölzer finden sich im Laubholz zum Teil recht breite Holzstrahlen, die im Tangentialschnitt durch ein Holzstück eine deutlich spindelförmige Form annehmen. Auch die Höhe der Holzstrahlen kann mit mehreren Millimetern deutlich grösser sein als bei Nadelhölzern (z. B. bei Eiche). Insgesamt zeigt sich das

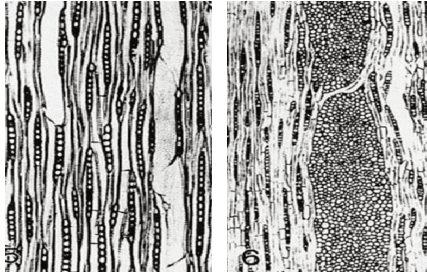


Abb. 2.12: Holzstrahlstruktur (Roskastanie und Eiche)  
(aus: Grosser (1977))

Muster der grösseren Variabilität bei Laubhölzern auch sehr eindrücklich bei den Holzstrahlen, nicht nur was Höhe und Breite sondern auch was den Gewebeanteil betrifft. Während Pappeln einen Holzstrahlanteil unter 10% haben, kann er bei Platanen bis zu 35% betragen. Die Holzstrahlen bestehen ausschliesslich aus Parenchymzellen, welche auch im Laubholz vorwiegend für die Speicherung von Reservestoffen und den radialen Transport verantwortlich sind (Abbildung 2.12).

Im Laubholz findet man auch deutlich mehr axial ausgerichtetes Parenchym als im Nadelholz. Diese Zellen liegen entweder vereinzelt, in Bändern oder um Gefässe herum verteilt vor. Für viele Laubhölzer, insbesondere Tropenhölzer ist die Formation der axialen Parenchymzellen rund um die Gefässe ein wichtiges Bestimmungsmerkmal. Eine wichtige Funktion haben diese Parenchymzellen bei Wundreaktionen, die zu einem Verschluss der Gefässe führen.

siehe: **Abbildung 2.14: Thyllenbildung**

### 2.5 Splintholz und Kernholz

Im Holz der Bäume wird das Wasser von den Wurzeln hinauf in die Krone transportiert. Ältere Bäume benutzen aber nicht den gesamten Holzkörper für die Leitung des Wassers, sondern nur die jüngeren Jahrringe. Wie viele Jahrringe dies sind, hängt stark von der Baumart ab. Die Zahl der beteiligten Jahrringe reicht entsprechend von nur 1–5 (ringporige Baumarten wie Ulme, Eiche, Robinie) bis hin zu 30–100. Den Holzteil, der für die Wasserleitung zuständig ist, nennt man Splintholz.

Der innere Holzteil, der nicht an der Wasserleitung beteiligt ist, wird allgemein als Kernholz bezeichnet. Ist der Verkernungsprozess in der Genetik der Baumart verankert, d. h. er läuft stets nach einem vorgegebenen Muster ab, spricht man von obligatorischer Kernholzbildung. Typische Baumarten mit obligatorischer Kernholzbildung, welche zu einem Farbkern führt, sind Kiefer, Douglasie, Eiche oder Robinie. Die Bäume produzieren in komplexen biochemischen Prozessen chemische Substanzen, welche in die Zellwände eingelagert werden. Durch diese Prozesse wird das Holz gegen den Abbau von Mikroorganismen besser geschützt und erreicht eine deutlich höhere Dauerhaftigkeit (Abbildung 2.13).

Es gibt aber auch Baumarten mit heller Verkernung, wie Fichte, Birke, Tanne, Weide, bei denen sich Splint und Kern farblich gleichen. Ausserdem gibt es Baumarten, die man als fakultative Kernholzbildner bezeichnet. Diese Baumarten, zu denen Esche und Buche gehören,



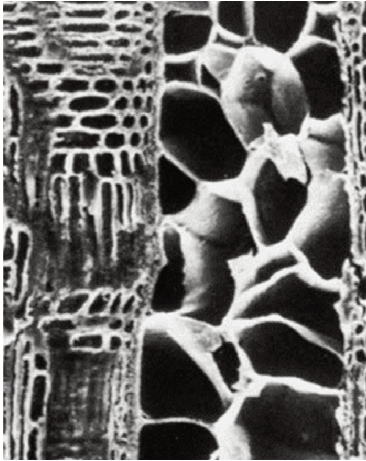
Abb. 2.13: Stammscheiben von Robinie, als Beispiel für eine obligatorische Verkernung (links) und Buche, als Beispiel für eine fakultative Verkernung (rechts)  
(Quelle des Buchenquerschnittbildes: [www6.fh-eberswalde.de](http://www6.fh-eberswalde.de))

weisen im Normalfall einen hellen Kern auf. Unter bestimmten Umständen, z. B. bei einer Reaktion auf Lufteinbruch, kann sich jedoch ein Farbkern ausbilden. Der Umriss eines solchen fakultativen Farbkerns ist dann meist nicht wie bei einem obligaten Kernholzbildner mit einer Jahrringgrenze identisch, sondern weist eine unregelmässige, wolkige Form auf. Fakultative Verkernungen führen nicht zu einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit, da die farbgebenden

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

den chemischen Substanzen nicht in die Zellwand eindringen können, sondern in den Zelllumen verbleiben.

siehe: **Tabelle 4.2 Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten**



Bei der obligatorischen Verkerung, aber auch bei Verwundungsreaktionen des Baumes können die Gefässe der Laubbäume als Abwehrmassnahme gegen Lufteinbruch oder Mikroorganismen auch verstopft werden. Die in der Nachbarschaft zu den Gefässen liegenden lebenden Parenchymzellen, lagern gummiartige Substanzen über die Tüpfel in die Lumina ein. Bei der sogenannten Verthyllung wachsen die Parenchymzellen sogar durch die Tüpfel in die Gefässe hinein und verstopfen die Leitungsbahnen in einer Form, die an die Entstehung von Kaugummiblasen erinnert. Auf diese Weise können selbst grosse Zelllumina mit wenig Material- und Energieaufwand wirkungsvoll verschlossen werden (Abbildung 2.14).

Abb. 2.14: Verthylltes Laubholzgefäss mit Thyllen aus benachbarten Parenchymzellen (aus: Raven et al. (1988))

### 2.6. Reaktionsholz

An Stämmen von Nadel- und Laubbäumen, die geneigt bzw. starken Windbelastungen ausgesetzt sind, findet man genauso wie an Ästen einen speziellen Gewebetyp, das sogenannte Reaktionsholz. Dieses ermöglicht es dem Baum, die Wachstumsrichtung von Ästen und Stamm bei der Holzbildung zu beeinflussen. Die Bildung von Reaktionsholz führt oft zu einer einseitigen Förderung des Wachstums, so dass der Stamm- bzw. Astquerschnitt nicht mehr rund, sondern eine stark exzentrische Form bekommt. In Nadelbäumen wird das Reaktionsholz auch Druckholz genannt, da dieses an der Unterseite oder windabgewandten Seite gebildete Gewebe Druckspannungen aufbauen kann. Bei Laubbäumen dagegen wird das Reaktionsholz an der Oberseite oder windzugewandten Seite gebildet und Zugholz genannt, da es eine sehr hohe Zugspannung aufzubauen vermag. Die Zellen des Reaktionsholzes weichen von den „normalen“ Fasern und Tracheiden in Aufbau und Chemismus ab, was teilweise sehr deutlichen Folgen für die Holzeigenschaften hat. Daraus ergeben sich entsprechende Schwierigkeiten und Einschränkungen bei Bearbeitung und Verwendung von Stammholz mit Reaktionsholzanteilen.

siehe: **Abbildung 2.20: Zelluloseorientierung**

### 2.7 Chemismus und struktureller Aufbau der Holzzellwand

#### 2.7.1 Zellwandpolymere

Holzzellwände bestehen im Wesentlichen aus den drei Zellwandkomponenten Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Dazu kommen noch geringe Anteile von Extraktstoffen, die insbesondere in Holzzellwänden des Kernholzes zu finden sind und die Dauerhaftigkeit des Holzes erhöhen können.

Zellulose besteht ausschliesslich aus einem Zuckerbaustein, der Glukose. Durch die sehr regelhafte, ausschliesslich lineare Anordnung im Molekül bilden sich mehrere Mikrometer lange Fibrillen mit einem Durchmesser von ca. 3 nm, die neben amorphen auch kristalline Bereiche besitzen (Abbildung 2.15).

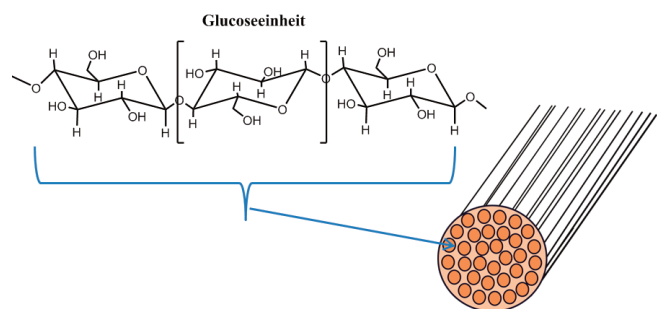


Abb. 2.15: Zellulose-Kette mit Glucoseeinheit und Mikrofibrille, welche durch Wasserstoffbrückenbindung und Van-der-Waals-Kräfte parallel angeordnet sind

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Da die Zellulosefibrillen um ein Vielfaches steifer sind als die anderen Zellwandpolymere, hat ihre Ausrichtung in der Zellwand eine besondere Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften aber auch für das Quellen und Schwinden des Holzes.

siehe: 3.3.4 Quellen und Schwinden, Abbildung 3.15: Elastizitätsmodul vs. Mikrofibrillenwinkel

Hemizellulosen bestehen auch aus Zuckerbausteinen, allerdings aus verschiedenen Zuckern, die nicht nur linear angeordnet, sondern auch über Seitenketten verzweigt sein können (Abbildung 2.16). Im Nadelholz dominieren die sogenannten Glukomannane bei geringeren Anteilen an Xylanen, welche im Laubholz stärker vertreten sind. Die Hemizellulosen umgeben die Zellulosefibrillen und bilden dabei eine grosse Anzahl von Wasserstoffbrückenbindungen zur Zellulosefibrillenoberfläche. Da Hemizellulosen auch an die dritte Zellwandkomponente, das Lignin binden können, nehmen sie eine Kopplungsfunktion zwischen Zellulose und Lignin wahr.

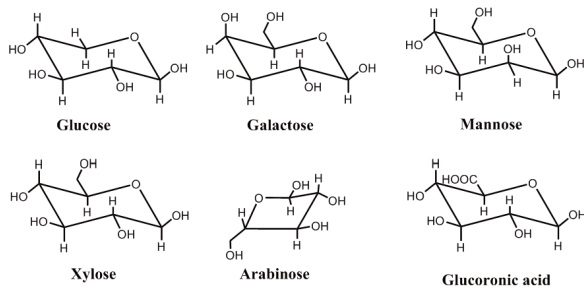


Abb. 2.16: Monomere Bestandteile von Hemizellulosen (nach: Verendel et al. (2011) modifiziert)

Die Anteile der Zellwandkomponenten an der Zellwand können sich zwischen Baumarten, Bäumen und Zelltypen leicht unterscheiden (Tabelle 2.1). Allgemein haben Nadelhölzer tendenziell höhere Ligninanteile, während bei Laubhölzern der Anteil an Hemizellulosen etwas höher ist. Zum strukturellen Aufbau der Zellwand durch die drei Zellwandkomponenten gibt es einige Modelle. Abbildung 2.18 zeigt ein gängiges Modell für die Nadelholzzellwand, welches die räumliche Anordnung der Polymere verdeutlicht.

Lignin, der sogenannte Holzstoff, besteht aus drei Phenylpropaneinheiten, die in einer Radikalpolymerisationsreaktion in der Zellwand vernetzt werden. Dabei können eine Vielzahl von Bindungstypen entstehen, wodurch sich ein sehr komplexes Makromolekül ergibt (Abbildung 2.17). Durch die Einlagerung des Lignins in die Zellwand wird ein Ausknicken der schlanken Zellulosefibrillen unter Druck verhindert. Daher ist das Lignin ein elementarer Baustein für die mechanische Stabilität der in die Höhe wachsenden Bäume.

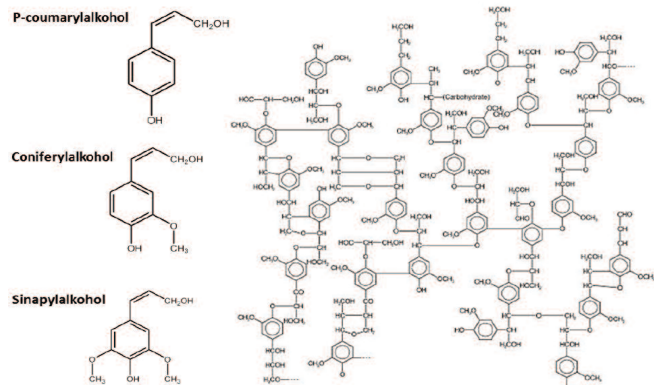


Abb. 2.17: Ligninvorstufen und Schema der polymerisierten Struktur in der Zellwand

Tab. 2.1: Anteile von Zellulose, Hemizellulosen und Lignin bei verschiedenem Baumarten (nach Timell (1967) modifiziert)

Bestandteil in %		Tanne	Buche	Fichte	Kiefer
Zellulose		42	42	41	41
Lignin		29	19	27	29
Hemicellulose	Xylan	9	35	13	9
	Mannan	18	3	18	18
Pectin		2	1	1	3

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### 2.7.2 Zellwandaufbau

So sehr sich die Holzzellen in Form, Grösse und Funktion auch unterscheiden, so folgt der Aufbau der verholzten Zellwand stets einem sehr ähnlichen Grundmuster. Die Zellwände von Holzzellen bestehen aus einer sehr dünnen Primärwand, die während der Zelldifferenzierung zunächst auf die zwei Zellen verbindende Mittellamelle aufgebracht

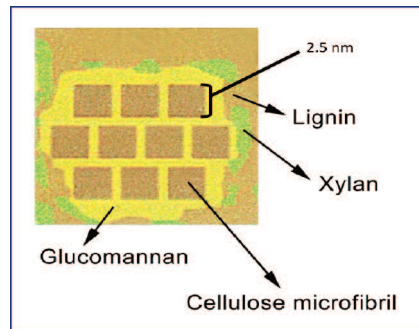


Abb. 2.18: Zellwandmodell (nach: Fahlen & Salmen (2005), BMM)

wird. Nach dem die Zelle ihre endgültige Grösse und Form erreicht hat, werden drei Sekundärwandschichten (S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>) aufgebracht, die sich konzentrisch um das Lumen anordnen (Abbildung 2.19). Die einzelnen Zellwandschichten unterscheiden sich in ihrer Dicke, der chemischen Zusammensetzung und in der Orientierung der Zellulose-Mikrofibrillen.

Die drei Sekundärwandschichten lassen sich vor allem anhand der Orientierung der Zellulosefibrillen unterscheiden. Die Fibrillen verlaufen grundsätzlich parallel zueinander allerdings, mit unterschiedlicher Neigung zur Zellachse. S<sub>1</sub> und S<sub>3</sub> haben einen Mikrofibrillenwinkel (Winkel zur Längsachse) von ca. 50–90°, während der Winkel der S<sub>2</sub> Schicht je nach Gewebetyp zwischen 0–60° variiert. Die S<sub>2</sub>-Schicht ist die dickste der drei Sekundärwandschichten. Vor allem, ihre Dicke und ihr Mikrofibrillenwinkel werden zur Optimierung des Eigenschaftsprofils einzelner Zelltypen und Gewebe angepasst. Frühholztracheiden und Gefässe haben Zellwände mit einer dünnen S<sub>2</sub>-Schicht, während Spätholztracheiden, Fasertracheiden und Fasern dicke S<sub>2</sub> Zellwandschichten besitzen. Die prominente Bedeutung der Variation der Dicke der S<sub>2</sub>-Schicht zwischen Früh- und Spätholztracheiden ist exemplarisch in Tabelle 2.2 aufgeführt.

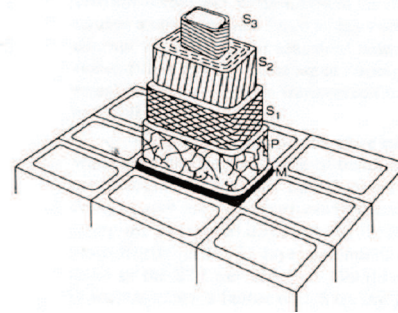


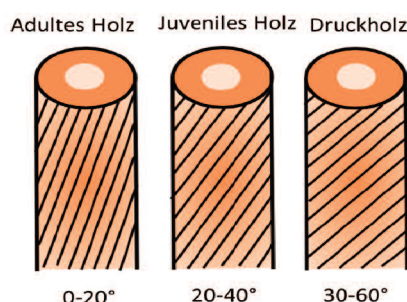
Abb. 2.19: Aufbau der verholzten Zellwand. Schematische Zeichnung eines Querschnitts (Modell aus: Booker (1996), basierend auf Arbeiten von Bailey (1938), Coté (1965) & Liese (1970))

siehe: 2.6 Reaktionsholz, 3.34 Quellen und Schwinden

Tab. 2.2: Anteile der Zellwandschichten in Tracheiden (nach Bodig & Jayne (1982) modifiziert)

Zellwandschicht	Frühholztracheiden		Spätholztracheiden	
	Dicke [µm]	[%]	Dicke [µm]	[%]
Primärwand	0.12	6.7	0.11	2.5
S <sub>1</sub>	0.23	12.8	0.30	6.8
S <sub>2</sub>	<b>1.42</b>	<b>78.9</b>	<b>3.99</b>	<b>89.9</b>
S <sub>3</sub>	0.03	1.7	0.04	0.9
Gesamt	1.80	---	4.44	---

Der Mikrofibrillenwinkel in der S<sub>2</sub> Schicht beträgt bei den sogenannten adulten Normalholztracheiden im äusseren Stammbereich 0–20°, während das sogenannte juvenile Holz im Inneren des Stammes (bis ca. zum 15. Jahrring) einen Mikrofibrillenwinkel (MFA) von 20–40° besitzt. Im Druckholz kann der MFA zwischen 30–60° betragen, was gravierenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und das Schwindverhalten des Holzes hat (Abbildung 2.20).



siehe: Abbildung 3.15: Elastizitätsmodul vs. Mikrofibrillenwinkel

Abb. 2.20: Schematische Zeichnung der Zelluloseorientierung in der S<sub>2</sub>-Zellwandschicht in adultem Holz, juvenilem Holz und Druckholz

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### 3 Eigenschaften des Holzes

#### 3.1 Richtungsabhängigkeit

Eine Folge der Struktur des Holzes mit einer Vorzugsorientierung entlang des Stammes und der konzentrischen Jahrringe ist die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften, d.h. eine starke Abhängigkeit von der Belastungsrichtung bzw. Bezugsebene. Um eine möglichst genaue

siehe: **Abbildung 2.3 Schnittebenen des Holzes**

räumliche Zuordnung im inhomogenen und anisotropen Material treffen zu

können, werden so, wie beim Baumstamm, auch bei Holzproben drei Schnittebenen unterschieden.

Neben der Angabe der Beanspruchungsrichtung ist eine eindeutige Beschreibung der strukturellen Ausrichtung des Holzkörpers für die Zuordnung von Eigenschaften erforderlich, welche über die Definition der Schnittebenen erfolgt (Abbildung 3.1).

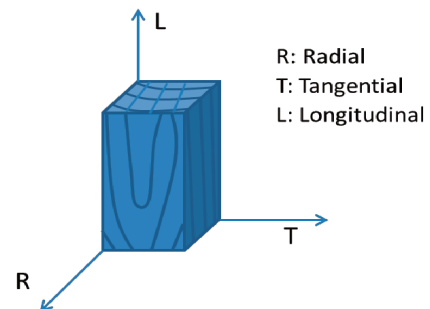


Abb. 3.1: Richtungsabhängigkeit bei Beanspruchung der Holzstruktur

#### 3.2 Dichte

##### 3.2.1 Definition und Bestimmung der Dichte

Die Rohdichte ist der Quotient aus der Masse und dem Volumen eines Holzkörpers bei einer gegebenen Holzfeuchte:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}$$

mit  $\rho$  = Rohdichte  
 $m$  = Masse  
 $V$  = Volumen  
 bei  $u$  = Holzfeuchte [%]

(3.01)

Neben der Rohdichte werden noch weitere Dichteangaben für die Dichtebestimmung von Holz verwendet:

- Darrdichte (Rohdichte im darrtrockenen Zustand: Masse darrtrocken/Volumen darrtrocken).
- Normal-Rohdichte (Rohdichte im Normalklima bei 20°C/65 % rel. Luftfeuchte, für die meisten europäischen Hölzer entspricht dies einer Holzfeuchte von ca. 12 %).
- Raumdichtezahl (Masse darrtrocken/Volumen im maximal gequollenen Zustand (= oberhalb Fasersättigung, s. Kap. 3.3.3)).
- Reindichte (Masse des darrtrockenen Holzes/Volumen der reinen Zellwand, ohne Hohlräume). Die Reindichte beträgt für alle Holzarten ca. 1500 kg/m<sup>3</sup>.

##### 3.2.2 Variation der Dichte

Die Dichte kann zwischen einzelnen Holzarten, innerhalb einer Holzart, innerhalb eines Stammes und innerhalb des Jahrrings variieren.

Bei der Variation der Dichte zwischen den Baumarten zeigen die exemplarischen Extreme zwischen Balsa mit ~100 kg/m<sup>3</sup> und Pockholz mit ~1200 kg/m<sup>3</sup> die Breite des Spektrums an. Im Durchschnitt ist die Dichte von Laubhölzern etwas höher als die Dichte von Nadelhölzern. In Kenntnis, dieser durch die Natur zur Verfügung gestellten Vielfalt gilt es, die Variabilität durch eine situativ richtige Werkstoffauswahl (Holzartenwahl) zu nutzen (Tabelle 3.1).

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Tab. 3.1: Dichte verschiedener Holzarten

Holzart	Darrdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Mittelwerte	Grenzwerte
Balsa	130	70-230
Tanne	370	310-460
Pappel	370	270-650
Fichte	420	280-610
Kiefer	490	300-860
Lärche	550	400-820
Ahorn	590	480-750
Eiche	640	380-900
Esche	650	410-820
Rotbuche	660	540-840
Pockholz	1230	1200-1320

Auch innerhalb einzelner Baumstämme ist die Variation der Dichte von grosser Bedeutung, wie Abbildung 3.2 für die Dichteunterschiede innerhalb eines Kiefernstammes exemplarisch dargestellt. Deutlich wird, dass die Dichte im peripheren basalen Bereich am grössten ist. Dies ist ein Hinweis auf die Adaption der Materialeigenschaften im Baum, da diese Bereiche bei Windlasten am stärksten beansprucht werden. Im Bezug auf die Holzverwendung macht diese Darstellung deutlich, dass die vormalige Lage eines Holzkörpers im Stamm grossen Einfluss auf seine Dichte und damit gekoppelte Eigenschaften hat.

Ein Grund für das Dichteprofil im Stamm ist, dass die jährlichen Zuwachsraten das Dichteprofil beeinflussen, allerdings baumartenspezifisch sehr unterschiedlich. Aus der Holzanatomie ergibt sich, dass Frühholz eine geringere Dichte als Spätholz aufweist. Dies hat Konsequenzen für die Dichteveriation innerhalb der Jahrringe, führt aber zusätzlich auch zu einer wichtigen Kopplung mit der Wachstumsdynamik des Baumes.

siehe: 2.2 Wachstumsdynamik

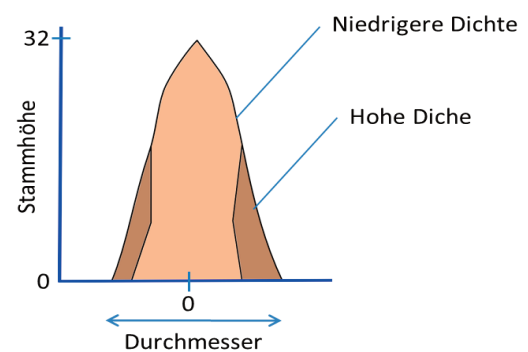


Abb. 3.2: Schematische, vereinfachende Darstellung der Dichteverteilung im Stamm einer Kiefer (nach: Trendelenburg (1955), modifiziert)

Bei Nadelhölzern wird bei einem starken Zuwachs mehr Frühholz gebildet, so dass breitere Jahrringe zu einer geringeren Dichte führen. Bei ringporigen Laubhölzern ergibt sich der umgekehrte Fall. Die Zahl der grossporigen Gefässe zu Beginn des Jahrrings ist festgelegt, so dass ein starkes Wachstum zu einem ausgeprägteren Spätholzbereich und damit zu einer höheren Dichte führt. Bei zerstreutporigen Laubhölzern lässt sich hingegen keine eindeutige Korrelation zwischen Jahrringbreite und Dichte finden (Abbildung 3.3).

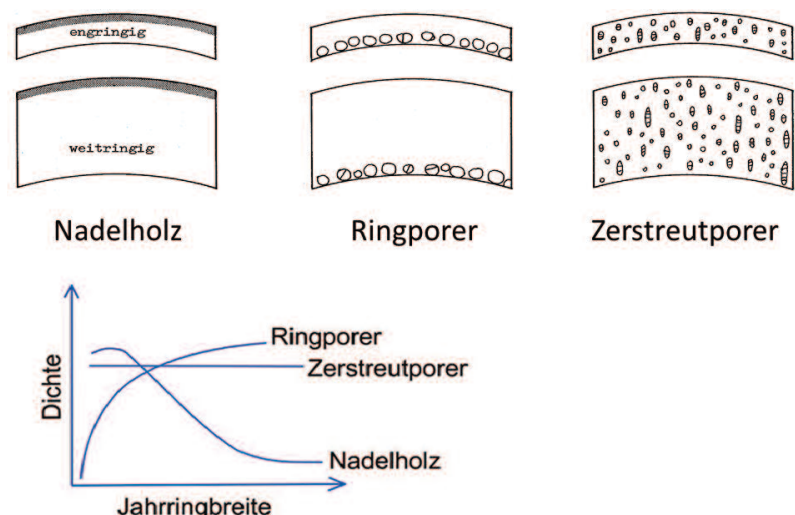


Abb. 3.3: Dichte und Zuwachs (Nadelhölzer, Ringporer, Zerstreutporer)

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### 3.2.3 Bedeutung der Dichte

Die Rohdichte beeinflusst nahezu alle im Weiteren zu besprechenden Holzeigenschaften massgeblich (z. B. Festigkeit, Schwind- und Quellmasse, Wärmeleitfähigkeit). So steigen mit zunehmender Dichte Festigkeit, Elastizitätsmodul und Quellung sowie die Wärmeleitzahl. Infolge des hygroskopischen Verhaltens des Holzes ist die Dichte feuchteabhängig, was im folgenden Kapitel erörtert wird. Es sollte daher immer mit der Dichte auch die Holzfeuchte angegeben werden.

siehe: **Abbildung 3.12: Festigkeit vs. Dichte**

### 3.3 Holzfeuchte

#### 3.3.1 Definition und Bestimmung der Holzfeuchte

Die Kenngrösse zur Beurteilung des Wasseranteils ist der Feuchtegehalt des Holzes, welche sich folgendermassen berechnet:

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} u \text{ Feuchtegehalt} \\ m_u \text{ Masse des Holzes im feuchten Zustand} \\ m_{dtr} \text{ Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand} \end{array} \quad (3.02)$$

Die Holzfeuchte kann sehr einfach durch Wiegen der ursprünglich feuchten Holzprobe und der nach Trocknung darrtrockenen Holzprobe bestimmt werden.

#### 3.3.2 Zusammenhang Holzfeuchte und Dichte

Abbildung 3.4 stellt den Zusammenhang zwischen Dichte und Feuchte dar. Mit Ausnahme von Baumarten, die eine Darrdichte deutlich über 1 g/cm<sup>3</sup> aufweisen, nimmt bei allen Holzarten die Dichte mit zunehmender Holzfeuchte zu.

Der spezifische Einfluss der Holzfeuchte auf die Dichte hängt mit den Auswirkungen der Wasseraufnahme und Wasserabgabe für die Masse und das Volumen des Holzes zusammen. Zu dessen Verständnis bedarf es eines vertieften Wissens über das Verhalten des Holzes gegenüber Feuchte.

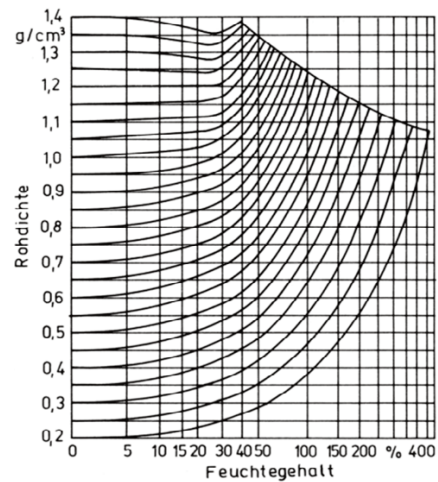


Abb. 3.4: Zusammenhang Dichte und Feuchte (aus: Kollmann (1951))

#### 3.3.3 Verhalten des Holzes gegenüber Feuchte

Holz ist ein kapillarporöses System. Sowohl in die Makro- als auch die Mikroporen (Poren im Zellwandsystem) des Holzes können sich Wassermoleküle einlagern (Abbildung 3.5). Bei der Interaktion von Holz und Wasser lassen sich drei Grenzzustände unterscheiden:

siehe: **2.5 Splintholz und Kernholz**



Abb. 3.5: Zellwand-Wasser Interaktion (nach: Skaar (1988))

- Darrtrocken: Es ist kein Wasser im Holz vorhanden, Holzfeuchte 0%.
- Wassersättigung: Das Mikro- und Makrosystem des Holzes (Zellwände und Zelllumina) sind maximal mit Wasser gefüllt. Die maximale Holzfeuchte hängt dabei stark von der Dichte des Holzes ab.
- Fasersättigung: Die gesamte Zellwand (intermicellare und interfibrillare Hohlräume) ist maximal mit Wasser gefüllt. Die Holzfeuchte liegt bei ca. 30%; wobei es je nach Holzart und Holzgewebe zu grossen

Unterschieden kommen kann. Wie viel Wasser in die Zellwand aufgenommen werden kann, hängt sehr stark von den Extraktstoffen ab. Deren Einlagerung in die Zellwände bei der Verkernung sowie der Harzgehalt haben grossen Einfluss auf die Holzfeuchte bei Fasersättigung (Tabelle 3.2).



## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Tab. 3.2: Fasersättigungspunkte verschiedener Holzarten/Holzartengruppen

Fasersättigung [%]	Holzarten/Holzartengruppen
16-18	Dalbergia, Tectona
22-24	ringporige und halbringporige Laubhölzer mit Farbkern
22-24	Nadelhölzer mit Farbkern und hohem Harzgehalt
26-28	Nadelhölzer mit Farbkern und mässigem Harzgehalt
30-34	Nadelhölzer ohne Farbkern
32-35	zerstreutporige Laubhölzer ohne Farbkern

Das oberhalb des Fasersättigungsbereiches eingelagerte Wasser wird als freies Wasser bezeichnet und wird als flüssiges Wasser durch Kapillarkräfte aufgenommen. Der Feuchtetransport im Holz erfolgt nach den Gesetzen der Kapillarphysik (von weiten in Richtung enger Kapillaren).

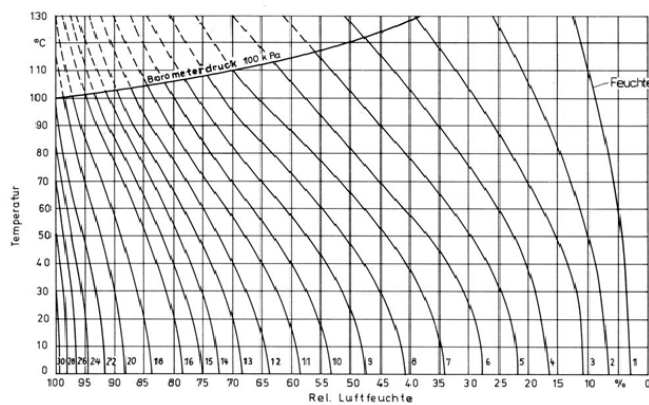


Abb. 3.6: Temperatur, rel. Luftfeuchte, Holzfeuchte; Zusammenhang für Fichtenholz (aus: Niemz (1993))

Durch die Verthyllung von Laubhölzern oder den Tüpfelverschluss bei Nadelhölzern wird die kapillare Feuchteaufnahme stark reduziert, was sich z. B. auch beim Tränken mit Holzschutzmitteln in einer geringen Tränkmittelaufnahme niederschlägt.

Unterhalb des Fasersättigungsbereiches wird bis zur Fasersättigung Wasser über Sorption aufgenommen. Dieser Wasseranteil im Holz wird als gebundenes Wasser bezeichnet, der Feuchtetransport erfolgt durch Diffusion.

### Sorptionsverhalten

Da Holz hygroskopisch ist, nimmt es Wasser bei Erhöhung der rel. Luftfeuchtigkeit aus der Luft durch Sorption auf bzw. gibt dieses bei Reduzierung der rel. Luftfeuchtigkeit durch Desorption an die Luft ab. Dies gilt bis zu einer relativen Luftfeuchte von 100%, bei der der Fasersättigungsbereich erreicht ist. Eine bestimmte rel. Luftfeuchte (und Temperatur) führt also zu einer holzartenspezifischen Holzfeuchte. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.6 exemplarisch für Fichtenholz gezeigt.

Ein genauerer Blick auf das Sorptionsverhalten des Holzes zeigt, dass zwischen der Adsorption und der Desorption ein Hysterese-Effekt vorhanden ist, d.h. bei der Desorption ist die Holzfeuchte um 1–2% höher als bei der Adsorption (Abbildung 3.7).

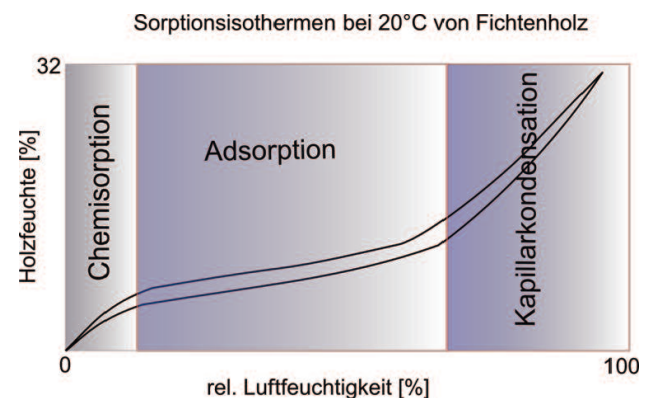


Abb. 3.7: Sorptionsverhalten von Holz, Sorptionsisothermen (Adsorption/Desorption) von Fichtenholz bei variabler rel. Luftfeuchte und Temperatur (aus: Niemz (1993), modifiziert)

Bei der Feuchteaufnahme und -bindung zwischen darrtrockenem und faseresättigtem Holz werden folgende charakteristische Stufen unterschieden:

- Chemisorption (Bildung einer monomolekularen Wasserschicht)
- Adsorption (Bildung einer polymolekularen Wasserschicht)
- Kapillarkondensation (Kondensation des Wassers in den Zellwandkapillaren)

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### Trocknungsverhalten

Da der Feuchtetransport unterhalb der Fasersättigung durch Diffusion erfolgt, laufen Trocknungs- und Befeuchtungsprozesse sehr langsam ab. Daher stellt sich bei grösseren Querschnitten stets ein Feuchteprofil ein. Während an der Oberfläche sehr schnell die Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist, kann dies im Inneren eines Holzbalkens erst nach Monaten oder

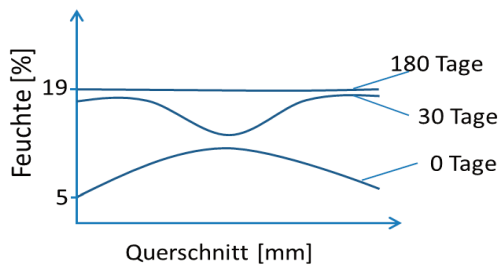


Abb. 3.8: Feuchteverteilung senkrecht zur Plattenebene in einer dreischichtigen Massivholzplatte (1m x 1m x 0,06m) nach Wechsel vom Normalklima bei 20°C/65% rel. Luftfeuchte auf 2°C/90% rel. Luftfeuchte

sogar Jahren der Fall sein. Da auch im Rauminnen oder im Freien die rel. Luftfeuchte ständig wechselt, kommt es praktisch nur im oberflächennahen Bereich zu einem Angleichen an die aktuelle rel. Luftfeuchte. Abbildung 3.8 zeigt das Feuchteprofil in einer 60mm dicken, 1m x 1m grossen Massivholzplatte. Diese wurde zunächst bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte bei 20°C/65% rel. Luftfeuchte klimatisiert, danach in einem Feuchteklima bei 2°C/90% rel. Luftfeuchte gelagert. Durch ein solches Feuchteprofil entstehen Spannungen, bei asymmetrischer Feuchteeinwirkung auch Verformungen, welche im nächsten Kapitel behandelt werden.

### 3.3.4 Quellen und Schwinden

Bei einer Holzfeuchteänderung unterhalb der Fasersättigung kommt es zu Dimensionsänderungen des Holzes. Bei Feuchteaufnahme kommt es zum Quellen, bei Feuchteabgabe zum Schwinden. Das Quell- und Schwindverhalten in den drei Hauptschnittrichtungen unterscheidet sich deutlich. In Faserrichtung (längs) ist das Quellen und Schwinden gering. Holz quillt in Radialrichtung 10 – 20 mal und tangential 15 – 30 mal stärker als in Faserrichtung (Abbildung 3.9).

Die Quell- und Schwindungsanisotropie ist in der Struktur des Holzes auf verschiedenen hierarchischen Ebenen begründet. Das deutlich geringere Quellen und Schwinden in Längsrichtung ist vor allem im Zellwandaufbau begründet. In den Zellwänden von normalen Holzzellen sind die Zellulosefibrillen mit einer nur geringen Neigung zur Längsachse angeordnet (kleiner Mikrofibrillenwinkel). Aufgrund der versteifenden Wirkung der Zellulosefibrillen in Längsrichtung führt eine Wasseraufnahme durch die Hemizellulosen und die amorphe Zellulose zu einer

Dimensionsänderung vornehmlich senkrecht zur Fibrillenorientierung. Für den Unterschied im Quell- und Schwindverhalten in der radialen und tangentialen Richtung, wird vor allem der Einfluss der Holzstrahlen, Früh- und

siehe: **Abbildung 2.19** und **Abbildung 2.20**

Spätholzübergänge sowie ein unterschiedliches Quellverhalten radialer und tangentialer Zellwände verantwortlich gemacht.

Aufgrund der engen Kopplung des Quell- und Schwindverhaltens mit der Holzstruktur, wird die Dimensionsänderung eines Holzkörpers bei Trocknung sehr stark von seiner ursprünglichen Lage im Stamm bestimmt (Abbildung 3.10).

Wird Holz beim Quellen bzw. Schwinden behindert (z. B. bei kreuzweise verklebten Schichten in Massivholzplatten), entstehen innere Spannungen, die zu plastischen Verformungen und bei Überschreiten der Festigkeit schliesslich zu Rissen führen können. Die entstehenden Quelldrücke wurden bereits in der Antike zum Sprengen von Steinen verwendet.

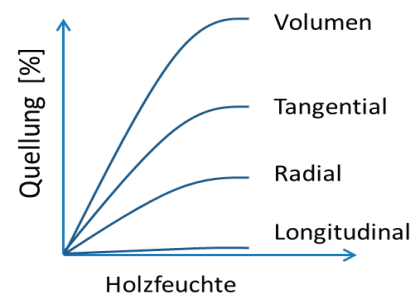


Abb. 3.9: Quellung von Rotbuche längs, radial, tangential und Volumen (aus: Niemz (1993), (Mörath) modifiziert)

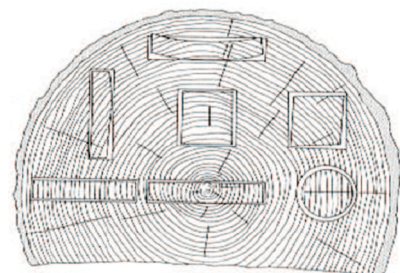


Abb. 3.10: Verformung von Holzproben beim Schwinden in Abhängigkeit von der Position im Stammquerschnitt (aus: Niemz (1993))

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Die Quellungsanisotropie des Holzes führt dazu, dass sich das trocknende Holz bei schräg verlaufenden Jahrringen stark verzieht. Auch lokale Inhomogenitäten (Dichteschwankungen, abweichende Jahrringlagen, Anteile von Reaktionsholz) können zu einer starken Verformung der Holzkörper führen. Durch Oberflächenbeschichtungen kann die Feuchteaufnahme des Holzes deutlich verzögert werden.

Häufig wird anstelle der maximalen Quell- bzw. Schwindmasse (Dimensionsänderung vom maximal gequollenen Zustand bezogen auf den Darrzustand) die differentielle Quellung in Quellung pro % Feuchteänderung angegeben (%/%) (Tabelle 3.3).

Tab. 3.3: Maximales und differentielles Quellmass verschiedener Holzarten

Holzart	Maximales Quellmass [%]			Differentielles Quellmass [%/%]	
	Längs	Radial	Tangential	Radial	tangential
Fichte	0.2-0.4	3.7	8.5	0.19	0.36
Kiefer	0.2-0.4	4.2	8.3	0.19	0.36
Lärche	0.1-0.3	3.4	8.5	0.14	0.30
Buche	0.2-0.6	6.2	13.4	0.20	0.41
Eiche	0.3-0.6	4.6	10.9	0.18	0.34
Teak	0.2-0.3	2.7	4.8	0.16	0.26

Wie aus Tabelle 3.3 ersichtlich, bestehen auch beim Quellverhalten grosse Unterschiede zwischen den Holzarten. Dies liegt an dem beschriebenen Einfluss von Struktur und Chemismus der Zellwände und der Zusammensetzung der Holzgewebe. Generell gilt, dass mit zunehmender Rohdichte die Quellung zunimmt.

### 3.3.5 Feuchtegehalt im Einsatzbereich

Aufgrund der mit einer Änderung der Holzfeuchte einhergehenden Dimensionsänderungen, ist es bei der Verwendung des Holzes zwingend erforderlich, eine Vorkonditionierung auf den Feuchtegehalt im Einsatzbereich vorzunehmen. Das heisst, dass Holz nur mit einer schon auf die klimatischen Bedingungen angepassten Holzfeuchte verbaut werden darf, da es sonst aufgrund von Rissbildung oder Quelldruck zu massiven Schäden kommen kann. In Tabelle 3.4 sind die charakteristischen Holzfeuchten bei unterschiedlichen Holzverwendungen angegeben.

Tab. 3.4: Feuchtegehalt im Einsatzbereich

Verwendung	Holzfeuchte [%]
Schnittholz für Wohnraummöbel	8-10
Schnittholz im Innenbereich	8
Schnittholz für Bauzwecke	12-18
Inneneinbauten	8-12
Heizkörperverkleidungen	6-8

### 3.3.6 Bedeutung der Holzfeuchte

Die Holzfeuchte beeinflusst alle Eigenschaften des Holzes wesentlich. Mit zunehmender Holzfeuchte sinkt die Festigkeit, steigt die Wärmeleitfähigkeit und erhöht sich die Anfälligkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen. Die Bauteilgrösse hat einen deutlichen Einfluss auf die Gleichgewichtsfeuchte und das Quell- und Schwindverhalten. Bei grossen Querschnittsabmessungen (z. B. bei Brettschichtholz) wird bei Klimawechsel die dem Klima entsprechende Gleichgewichtsfeuchte meist nur in den Randzonen erreicht. Im Ergebnis eines sich über dem Holzquerschnitt einstellenden Feuchteprofils entstehen innere Spannungen, Verformungen und bei Überschreiten der Festigkeit häufig Risse. Durch die Überlagerung von äusseren mechanischen Beanspruchungen und inneren Spannungen kann das Verhalten von Bauteilen wesentlich beeinflusst werden. Dies hat z. B. einen Einfluss auf das Kriechen oder auch auf die Festigkeit von unter Dauerlast beanspruchten Holzkonstruktionen. So kann es durch Überla-

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

gerung von mechanischer Zugbelastung und Schwinden in den Randzonen eines Balkens dazu kommen, dass Holz in der Trocknungsphase unter Dauerlast versagt, da sich mechanische Belastung und Schwindspannungen addieren, in der Befeuchtungsphase dagegen kein Versagen auftritt, da sich Zugbelastung und Quellungsspannungen gegenseitig kompensieren.

### 3.4 Thermische Eigenschaften

Im Vergleich zur rel. Luftfeuchte ist der Einfluss der Temperatur unter normalen Umgebungsbedingungen auf die Holzeigenschaften deutlich geringer. Die thermische Ausdehnung ist gering und wird praktisch meist vernachlässigt. Im Bezug auf die Holzverwendung ist wichtig, dass Holz eine geringe Wärmeleitfähigkeit hat und damit eine geringe Wärmeleitfähigkeit hat. Daher kann es gut als Dämmmaterial eingesetzt werden (Wärmeleitfähigkeit Vollholz ca.  $0,13 \text{ W/mK}$ , Faserdämmplatten ca.  $0,045 \text{ W/mK}$ ).

siehe: 5.2.4 Holzwerkstoffe auf Faserbasis

Holz besitzt eine hohe spezifische Wärmekapazität von ca.  $1300 \text{ J/kgK}$ , ist brennbar und somit in die Baustoffklasse B einzuordnen. Bei grossen Abmessungen bildet sich jedoch auf der Aussenseite eine isolierende Holzkohleschicht, die das Weiterbrennen verhindert. Daher tritt beim Holz der Festigkeitsverlust nicht so plötzlich ein, wie beispielsweise beim Stahl.

### 3.5 Mechanische Eigenschaften von Vollholz

Vollholz hat bezogen auf seine relativ geringe Dichte im Vergleich zu anderen Werkstoffen in seiner Längsrichtung sehr gute mechanische Eigenschaften. Allerdings sind die Eigenschaften senkrecht zur Faser deutlich „schlechter“. Dazu muss berücksichtigt werden, dass es eine Vielzahl von materialspezifischen Faktoren, wie Umgebungsbedingungen, Beanspruchungsrichtung und -art gibt, welche die Materialantwort des Holzes stark beeinflussen. Darin ist die grosse Variabilität des Holzes begründet, welche bei der Holzverwendung stets zu berücksichtigen ist. Im Folgenden wird der Einfluss dieser Faktoren auf die Holzeigenschaften behandelt.

#### 3.5.1 Einflussfaktoren auf Steifigkeit und Festigkeit

Das mechanische Verhalten des Holzes wird sowohl von den bisher besprochenen materialspezifischen Eigenschaften (Holzstruktur, Chemismus, Dichte) als auch von den Umgebungsparametern (Feuchtigkeit, Temperatur) beeinflusst.

Holzstrukturbedingt hat die Beanspruchungsart eine grosse Bedeutung. Aufgrund der Faser-Komposite-Struktur ist bei kleinen, fehlerfreien Proben Holz ca. doppelt so zugfest wie druckfest (die Biegefestigkeit liegt dazwischen), während der Elastizitätsmodul bei Zug und Druck annähernd gleich ist. (Abbildung 3.11).

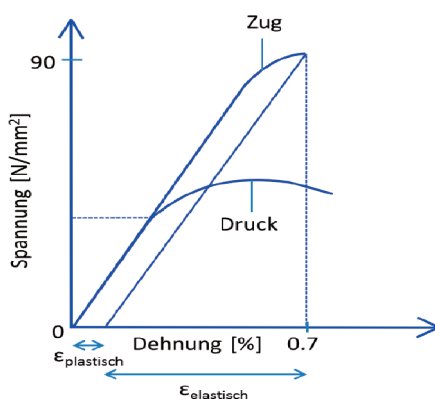


Abb. 3.11: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zug/Druck in Längsrichtung (aus: Niemz (1993))

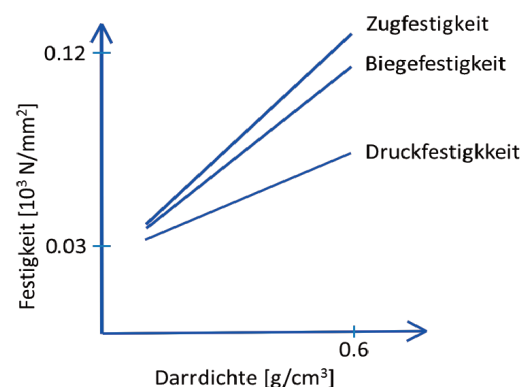


Abb. 3.12: Zug-, Biege- und Druckfestigkeit in Längsrichtung vs. Dichte (aus: Niemz (1993), nach Knigge und Schulz, modifiziert)

Materialseitig lässt sich der Einfluss der Holzstruktur u. a. anhand der Dichte erkennen, die als makroskopischer Parameter anzeigt, wie viel Zellwandmaterial pro Volumen produziert

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

wurde. Sowohl die Festigkeit, wie in Abbildung 3.12 gezeigt, als auch die Steifigkeit des Holzes stehen in einem linearen Zusammenhang mit der Dichte.

Der Einfluss der Dichte auf die mechanischen Eigenschaften ist zu einem grossen Teil mit dem Einfluss der Holzbildungsdynamik gekoppelt. Dies verdeutlicht Abbildung 3.13 mit einer generellen Gegenüberstellung von Festigkeit und Jahrringbreite für Nadelhölzer.

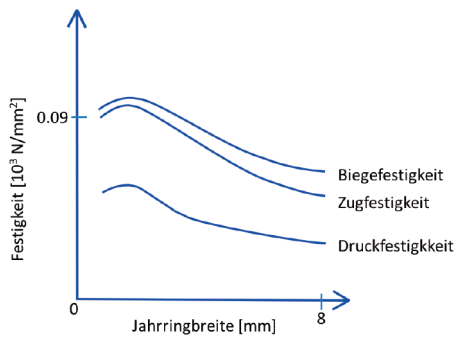
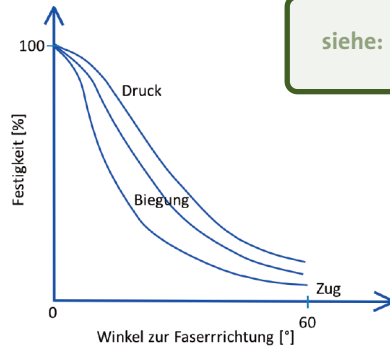


Abb. 3.13: Zug-, Biege- und Druckfestigkeit in Längsrichtung vs. Jahrringbreite bei Nadelhölzern (aus: Niemz (1993), nach Knigge und Schulz, modifiziert)



siehe: Kapitel 3.3.2 Variation der Dichte

Abb. 3.14: Zug-, Biege- und Druckfestigkeit vs. Faserrichtung (aus: Niemz (1993), nach Knigge und Schulz, modifiziert)

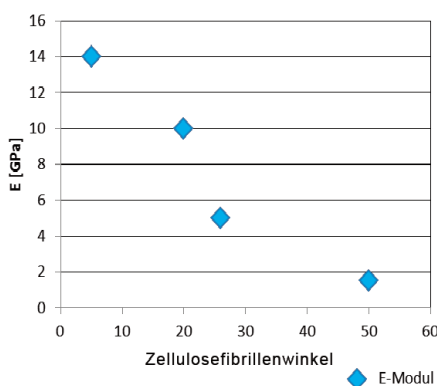
Ein weiterer wichtiger materialeitiger Faktor ist die Anisotropie des Werkstoffs. Die Materialantwort hängt sehr stark von der Beanspruchungsrichtung ab. So ist Holz in Längsrichtung deutlich steifer und fester als quer zur Faser (dabei ist radial höher als tangential). Mit zunehmendem Winkel zwischen Probenlängsachse und Faserrichtung (Faser-Last-Winkel) sinkt die Steifigkeit und, wie in Abbildung 3.14 gezeigt, die Festigkeit deutlich ab.

Der Winkel zwischen radialer und tangentialer Richtung wird auch als Jahrringneigung bezeichnet und ist z. B. bei Schubbelastung in der RT-Ebene von Bedeutung.

Sehr gering sind Druckfestigkeit und Zugfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung, was beim Konstruieren mit Holz (z. B. bei Holzverbindungen) zu berücksichtigen ist. Zur Verdeutlichung stellt Tabelle 3.5 die Zug- und Druckfestigkeit senkrecht und parallel zur Faser für Buche und Fichte exemplarisch gegenüber.

Tab. 3.5: Druckfestigkeit und Zugfestigkeit senkrecht und parallel zur Faserrichtung

Holzart	Zugfestigkeit [MPa]		Druckfestigkeit [MPa]	
	parallel	senkrecht	parallel	senkrecht (2-5% Stauchung)
Fichte	80	4-5	40	5-6
Buche	135	10-20	60	7-8



Neben der Faserorientierung gibt es auch auf der hierarchischen Ebene der Zellwandpolymere, mit der Orientierung der Zellulosefibrillen einen Parameter mit grossem Einfluss auf das mechanische Verhalten des Holzes. Je grösser der Mikrofibrillenwinkel in der Zellwand, umso weniger steif ist das Holz (Abbildung 3.15).

siehe: Kapitel 2.7.2 Zellwandaufbau

Abb. 3.15: Elastizitätsmodul bei Zugbeanspruchung in Längsrichtung in Abhängigkeit vom Mikrofibrillenwinkel (MFA) (aus: Reiterer et al. (1999) Phil. Mag, modifiziert)

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Neben Dichte, Mikrofibrillenwinkel, Beanspruchungsart und -richtung bestimmen noch weitere Materialparameter wie beispielsweise die chemische Zusammensetzung der Zellwand oder auch der Grad des Holzabbaus durch Mikroorganismen eine wichtige Rolle.

Im Bezug auf die Umgebungsparameter ist der Einfluss der rel. Luftfeuchte deutlich gravierender als der der Temperatur. Sowohl der Elastizitätsmodul als auch die Festigkeit sinkt mit steigender Holzfeuchte bis zum Fasersättigungsbereich. Die Wasseraufnahme in die Zelllumina oberhalb des Fasersättigungsbereiches hat keinen weiteren Einfluss auf das mechanische Verhalten, so dass Elastizitätsmodul und Festigkeit über dem Fasersättigungsbereich konstant bleiben (Abbildung 3.16).

Wie beschrieben wirken sich alle Einflussfaktoren sowohl auf die elastischen Eigenschaften als auch auf die Festigkeit aus. Insbesondere in Bezug auf die Festigkeit ist die Variabilität der Eigenschaften von grosser Bedeutung, da sie grossen Einfluss auf den Einsatzbereich des Holzes hat. Hinsichtlich der elastischen Eigenschaften des Holzes bedarf es eines genaueren Blickes auf die Orthotropie des Werkstoffs und die Beschreibung des Werkstoffs mit elastischen Konstanten.

### 3.5.2 Variabilität der Festigkeit

Die Heterogenität und Anisotropie des biologischen Werkstoffes Holz führt zu einer grossen Variabilität der Eigenschaften, was in Abbildung 3.17 exemplarisch für die Druck-, Biege- und Zugfestigkeit dargestellt ist.

Insbesondere die Streuung der Festigkeiten macht eine Sortierung des Holzes notwendig. Sortierkriterien bei einer maschinellen Sortierung sind z. B. Elastizitätsmodul, Dichte und Ästigkeit des Holzes. Über die Definition von Festigkeitsklassen werden zulässig anzusetzende Festigkeitswerte festgelegt (Tabelle 3.6).

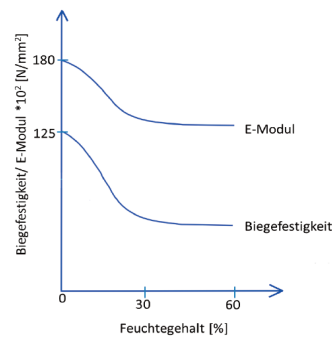


Abb. 3.16 Steifigkeit und Festigkeit in Längsrichtung vs. Feuchte (aus: Niemz (1993), (nach: Neuhaus) modifiziert)

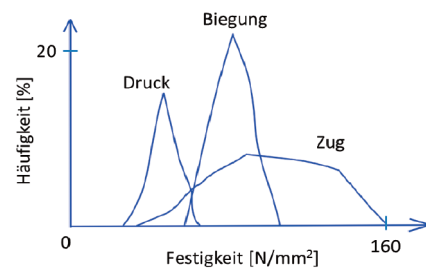


Abb. 3.17: Häufigkeitsverteilung Zug, Druck, Biegung in Längsrichtung (aus: Niemz (1993), modifiziert)

Tab. 3.6: Festigkeitsklassen für Nadelholz nach EN 338

Festigkeitsklasse	C16	C18	C24	C27	C30	C35	C40
Festigkeitskennwerte [N/mm <sup>2</sup> ]							
Biegung	16	18	24	27	30	35	40
Zug parallel	10	11	14	16	18	21	24
Druck parallel	17	18	21	22	23	25	26
Druck rechtwinklig	2.2	2.2	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
Schub und Torsion	1.8	2	2.5	2.8	3	3.4	3.8

Interessant ist die Beobachtung, dass obwohl bei fehlerfreien Holzproben die Zugfestigkeit ca.

doppelt so hoch ist wie die Druckfestigkeit, sind die in den Sortierklassen angegebenen charakteristischen Festigkeitswerte des Nadelbauholzes bei Druck parallel zur Faser höher als bei Zug, was u. a. auf die im Bauholz vorhandenen Äste zurückzuführen ist.

siehe: **Abbildung 3.11: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zug/Druck**

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### 3.5.3 Richtungsabhängigkeit der elastischen Eigenschaften

Die elastischen Eigenschaften sind beim Einsatz von Holz im Zusammenhang mit der Gebrauchstauglichkeit massgebend. Bei der Dimensionierung muss sichergestellt werden, dass ein Bauteil nicht nur eine genügende Festigkeit besitzt, sondern die beanspruchenden Kräfte auch ohne unzulässige Verformung aufnehmen, respektive übertragen kann.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

Holz ist ein orthotropes Material, für dessen Berücksichtigung das erweiterte Hooke'sche Gesetz gilt (Abbildung 3.18).

Abb. 3.18: Erweitertes Hooke'sches Gesetz für orthotrope Werkstoffe

Somit kann Vollholz durch drei Elastizitätsmoduln ( $E_L, E_R, E_T$ ), drei Schubmoduln ( $G_{RT}, G_{LR}, G_{RT}$ ) und drei Poissonsche Konstanten ( $\mu_{RL}, \mu_{TL}, \mu_{TR}$ ) beschrieben werden, da für Vollholz näherungsweise gilt:

$$\frac{\mu_{RL}}{E_R} = \frac{\mu_{LR}}{E_L}; \frac{\mu_{TL}}{E_T} = \frac{\mu_{LT}}{E_L}; \frac{\mu_{TR}}{E_T} = \frac{\mu_{RT}}{E_R} \tag{3.03}$$

Bei FE-Berechnungen muss auch zusätzlich der Einfluss des Winkels zwischen RT sowie LT und LR berücksichtigt werden. Es wird dann mit sogenannten Zylinderkoordinaten gerechnet.

siehe: 3.1 Richtungsabhängigkeit der Holzstruktur

In den drei Hauptschnittrichtungen gelten folgende Verhältnisse für die elastischen Konstanten des Vollholzes:

<b>Elastizitätsmoduln (E):</b>	$E_T$	:	$E_R$	:	$E_L$
bei Nadelholz:	~1	:	~1,7	:	~20
bei Laubholz:	~1	:	~1,7	:	~13
<b>Schubmoduln (G):</b>	$G_{LR}$	:	$G_{LT}$	:	$G_{RT}$
bei Nadelholz:	~1	:	~1	:	< 0,1
bei Laubholz:	~1,3	:	~1	:	~0,4
mit:	$G_{LR}$ (Schub der Radialfläche) $G_{LT}$ (Schub der Tangentialfläche) $G_{RT}$ (Schub der Hirnfläche)				

Insbesondere der geringe Schubmodul  $G_{RT}$  (Schub der Hirnfläche) des Nadelholzes kann bei schubbelasteten Bauteilen zum Versagen durch Rollschub in der RT Ebene führen. Es besteht ein deutlicher Einfluss des Faser-Last-Winkels (Winkel zwischen RL und LT Richtung) und der Jahrringlage (Winkel zwischen RT).

Tabelle 3.7 zeigt elastische Konstanten für Fichte, die von verschiedenen Autoren erhoben wurden. Diese Übersicht soll neben den absoluten Werten auch die grosse Streubreite der Messergebnisse für eine einzige Holzart vermitteln und auf diese Weise die materialspezifische Variabilität der Holzeigenschaften erneut aufzeigen.

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Tab. 3.7: Ausgewählte Kennwerte elastischer Eigenschaften für Fichte nach verschiedenen Autoren. 1. Index: Richtung der Kraft. 2. Index: Richtung der Dehnung.

Autor	Feuchte	$E_L$	$E_L/E_R$	$G_{LT}$	$G_{LR}/G_{LT}$	$\mu_{RL}$	$\mu_{LR}$
		$E_R$	$E_L/E_T$	$G_{LR}$	$G_{LR}/G_{RT}$	$\mu_{TL}$	$\mu_{LT}$
		$E_T$	$E_R/E_T$	$G_{RT}$	$G_{LT}/G_{RT}$	$\mu_{TR}$	$\mu_{RT}$
	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]
DIN 6834 (1979)	12	10000	12.5	650	0.9		0.33
Neuhaus (1981)	13	11905	15.1	723	0.8	0.055	0.436
		790	29.5	601	14.8	0.035	0.613
		404	2.0	41	17.8	0.323	0.629
Krabbe <sup>1</sup>	12.2	11364	10.3	686	1.1		
		1109	26.4	742	20.4		
		430	2.6	36	18.9		
Hörig <sup>1</sup>	9.8	16234	23.2	775	0.8	0.019	0.43
		699	40.6	629	17	0.013	0.53
		400	1.7	37	21	0.24	0.42
Wommelsdorff <sup>1</sup>	13.7	11287	11.5			0.049	0.447
		980	26.3			0.028	0.561
		429	2.3			0.26	0.586
Bodig & Jayne (1982)	12	10940	13.2	663	1.1		
		830	22.2	699	10.6		
		493	1.7	66	10		
Hearmon <sup>2</sup>	12	13760	15.1	735	0.7	0.03	
		910	28.1	510	15.7		0.537
		490	1.9	33	22.6		0.56

<sup>1</sup> zitiert in Neuhaus (1981)

<sup>2</sup> zitiert in Kollmann und Cote (1968)

### 3.5.4 Zeitabhängigkeit des Verhaltens von Holz

Holz ist viskoelastisch, d. h. die Eigenschaften sind zeitabhängig. Bei Langzeitversuchen unter mechanischer Last kommt es zum Kriechen und zur Spannungsrelaxation. Diese haben zeitverzögerte elastische und auch plastische Komponenten, wie eingehend im Werkstoffeigenschaftsteil beschrieben.

siehe Teil 1: 2.5 Zeitabhängiges Materialverhalten

Die Zeitabhängigkeit gilt für den Elastizitätsmodul, den Schubmodul und die Poissonschen Konstanten ebenso wie für die Festigkeitseigenschaften. Bei letzteren spricht man in diesem Falle von der Dauerstandfestigkeit. Wird die mechanische Belastung zusätzlich durch eine Feuchteänderung (Ad- oder Desorption und dadurch bedingtes Quellen und Schwinden) überlagert, spricht man vom sogenannten mechanosorptiven Effekt. Dieser ist z. B. beim Kriechen aber auch bei Eigenspannungen durch Feuchteeinwirkung zu beachten. Bei Verformungen oder Spannungsberechnungen ist daher der Effekt der Feuchteänderung ebenfalls zu berücksichtigen.



## 4 Holzschutz

### 4.1 Gefährdungen des Holzes

Als biologisches Material ist Holz auch biologisch abbaubar. Holzzerstörende Pilze und Insekten können das Holz angreifen und nicht nur das Erscheinungsbild der Oberflächen beeinträchtigen sondern auch die mechanischen Eigenschaften deutlich verschlechtern. Im lebenden Baum ist Holz durch seinen hohen Feuchtegehalt geschützt, da die holzabbauenden Mikroorganismen Sauerstoff für Atmung und Stoffwechsel benötigen. Mit der Trocknung von Holz für seine Verwendung wird es allerdings ein geeignetes Substrat für Mikroorganismen. Verschiedene Insekten können das Holz unter trockenen Raumklimabedingungen angreifen (z. B. Möbelkäfer), während das Holz für den Abbau durch Pilze in der Regel eine Feuchte von deutlich über 20% haben muss, die sich aber bei der Holzverwendung im Aussenbereich unter ungünstigen Bedingungen sehr schnell einstellen kann (Tabelle 4.1).

Tab. 4.1: Einsatzort und Gefährdung

Klasse	Einsatzort	Feuchte	Organismen
1	innen	trocken	Insekten
2	innen	gelegentlich feucht	Insekten, Pilze
3.1	aussen, witterungsgeschützt	gelegentlich feucht	Insekten, Pilze
3.2	aussen, ungeschützt	häufig feucht	
4.1	Erdkontakt	vorwiegend feucht	Insekten, Pilze (inkl. Moderfäule)
4.2	Erdkontakt (hohe Beanspruchung; in Kontakt mit Süswasser)	ständig feucht	
5	im Meerwasser	ständig feucht	Meerestiere (z.B. Schiffsbohrmuschel)

Neben den Mikroorganismen spielen insbesondere bei Fassaden auch die Sonneneinstrahlung und die abrasive Abtragung von Holzbestandteilen für das Erscheinungsbild der Oberfläche eine wichtige Rolle. Insbesondere die geringe UV-Stabilität des Lignins führt dazu, dass die Sonneneinstrahlung ein Vergrauen der Holzoberflächen bewirkt.

### 4.2 Kategorien von Holzschutzmassnahmen

Es gibt eine Vielzahl von Massnahmen, um Holz gegen biologischen Abbau und Zersetzungsprozesse oder allgemein gegen Zerstörung zu schützen, wie z. B. organisatorischer Holzschutz, konstruktiver Holzschutz, chemischer Holzschutz, biologischer Holzschutz, physikalischer Holzschutz, Holzmodifikationen oder Brandschutz. Im Rahmen der Vorlesung können nur einige wenige dieser Massnahmen kurz Erwähnung finden. Wichtig ist die Feststellung, dass viele Massnahmen eine hohe Wirksamkeit, aber auch teilweise negative Nebenerscheinungen haben. Zudem kann keine Holzschutzmassnahme die generelle biologische Abbaubarkeit des Holzes grundsätzlich aufheben, so dass vielmehr nur ein mehr oder weniger langes zeitliches Aufschieben erreicht werden kann.

siehe: 2.5 Splintholz und Kernholz

#### Natürlicher Holzschutz

Unter natürlichem Holzschutz ist zu verstehen, dass das Kernholz von Holzarten eingesetzt wird, die eine hohe natürliche Dauerhaftigkeit besitzen (Splintholz ist nicht dauerhaft). Die Dauerhaftigkeit ergibt sich aus der obligatorischen Verkernung von Hölzern. Das Kernholz der Robinie ist beispielweise so dauerhaft wie das Holz einiger Tropenhölzer, während das Holz der Fichte oder Buche nur wenig dauerhaft ist.

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Tab. 4.2: Dauerhaftigkeitsklassen verschiedener Hölzer

Holzart	Dauerhaftigkeit des Kernholzes gegen Pilzbefall
Tanne	wenig dauerhaft
Lärche	mässig bis wenig dauerhaft
Fichte	wenig dauerhaft
Kiefer	mässig bis wenig dauerhaft
Douglasie	mässig bis wenig dauerhaft
Eiche	dauerhaft
Robinie	dauerhaft bis sehr dauerhaft

### Konstruktiver Holzschutz

Konstruktiver Holzschutz bezieht sich auf konstruktive Massnahmen, die beim Holzbau das Gefährdungspotential verringern. Dazu gehören die Vermeidung von Erdkontakt und Spritzwasser sowie Massnahmen, die die Ansammlung von Wasser (Tropfwasser) verhindern und der Schutz gegen Witterungseinflüsse, wie z. B. ein grosser Dachüberstand.

### Chemischer Holzschutz

Chemische Holzschutzmassnahmen sollten nur ergriffen werden, wenn mit konstruktiven Massnahmen nicht ausreichend geschützt werden kann. In der Regel werden fungizide Substanzen in das Holz im Kesseldruckverfahren eingebracht, um so einen Pilzbefall trotz für den Pilz geeigneter Holzfeuchte zu vermeiden. Die Tränkbarkeit der Holzarten ist sehr verschieden und hängt bei Nadelhölzern insbesondere von der Ausformung der Kreuzungsfeldtüpfelung zwischen Holzstrahlparenchym und Tracheiden ab, da durch den Hoftüpfelverschluss zwischen Tracheiden die natürlichen Transportbahnen des Holzes im Baum nach dem Ernten verschlossen sind.

siehe: 2.3 Nadelholz

### Holzmodifikation

Holzmodifikationen zielen darauf, durch eine chemische Veränderung der Zellwand die Wasseraufnahme des Holzes zu verringern und damit die Dimensionsstabilität aber auch die Dauerhaftigkeit zu erhöhen, da Pilze dann nicht ausreichend Wasser für den Holzabbau zur Verfügung haben. Modifikationen der Oberfläche sollen zu einer höheren UV Stabilität des Holzes führen.

Bei einer thermischen Behandlung (Thermoholz) wird Holz bei Sauerstoffmangel stark erhitzt ( $>160^{\circ}\text{C}$ ). Das Ergebnis ist ein farblich verändertes, dunkleres Holz, welches eine erhöhte Dimensionsstabilität und eine geringere Ausgleichsfeuchte aufweist. Allerdings führt die Behandlung auch zu einer Versprödung des Holzes, so dass dieses Verfahren für mechanisch beanspruchte Holzelemente nicht geeignet ist. Der prominenteste Vertreter der chemischen Holzmodifikationen ist die Acetylierung, bei der die Hydroxylgruppen in der Zellwand abgesättigt werden. Die Dimensionsstabilität des Holzes ist deutlich erhöht, allerdings verbleibt bei dem etablierten Verfahren Essigsäure im Holz, welche zu einem unangenehmen Geruch führt und gegebenenfalls Verbindungsmittel angreift. In jüngster Zeit gibt es vermehrt Anstrengungen, das Holz durch die Einlagerung von Mineralien zu schützen (z. B. Silikate) oder durch *in-situ* Polymerisation hydrophobe Substanzen dauerhaft in der Zellwand zu etablieren.

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

# 5 Holzwerkstoffe

### 5.1 Einführung in die Holzwerkstoffe

Holzwerkstoffe entstehen durch Zerlegen des Holzes und anschliessendem Zusammenfügen der entstandenen Teile in geeigneter Weise, häufig (aber nicht ausschliesslich) mit Hilfe von Klebstoffen (Abbildung 5.1).

Das Holz kann durch Auftrennung in Strukturelemente von sehr unterschiedlicher Grösse zerlegt werden (Abbildung 5.2). Art und Grösse der Strukturelemente sind wichtige Kriterien zur Einteilung der Holzwerkstoffe (siehe Kapitel 5.2).

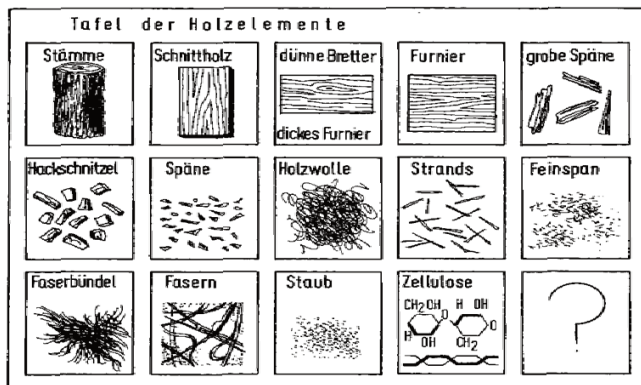


Abb 5.2: Strukturelemente von Holzwerkstoffen (aus Dunky und Niemz 2002, nach Marra 1972)

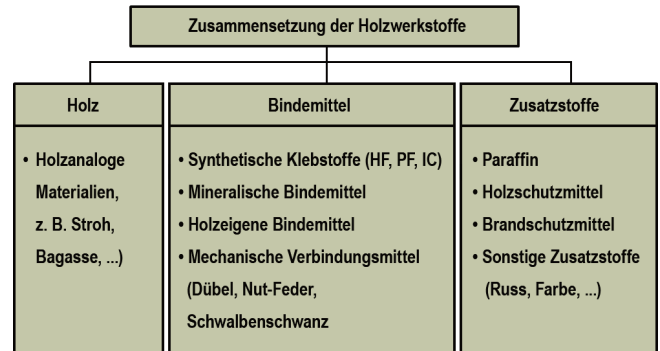


Abb. 5.1: Zusammensetzung von Holzwerkstoffen

Bei der Herstellung von Holzwerkstoffen sind zwei Motivationen massgebend. Zum einen geht es um eine Nutzung von Holzsortimenten, die für den Vollholzgebrauch nicht geeignet wären. Bei der Spanplatte beispielsweise geht es im Wesentlichen um eine optimale Rohstoff- und Materialnutzung, dem der Aspekt der Eigenschaftsoptimierung untergeordnet ist. Zum anderen dient die Holzwerkstoffherstellung aber auch einer gezielten Eigenschaftsoptimierung, indem man vor allem für das Bauwesen Produkte generiert, die nachteilige Holzeigenschaften nivellieren oder vorteilhafte Eigenschaften des Holzes besonders verstärken. Für diese Holzwerkstoffprodukte hat sich zusätzlich der Begriff „Engineered Wood Products“ etabliert.

Das Zerlegen des Holzes führt zu Holzwerkstoffen, die sich in ihren Eigenschaftsprofilen teilweise sehr stark von denen des Vollholzes unterscheiden. Das Holz in immer kleinere Einheiten zu zerlegen, kann zu Einzelkomponenten mit immer besseren mechanischen Eigenschaften führen, wie in Abbildung 5.3. für den Elastizitätsmodul dargestellt. Während Vollholz in Längsrichtung einen Elastizitätsmodul von ca. 10 GPa hat, besitzen aus dem Holz isolierte kristalline Bereiche der Zellulose einen Elastizitätsmodul von ca. 250 GPa. Um diese Eigenschaften für einen Hochleistungs-Holzwerkstoff nutzen zu können, würde es aber insbesondere einer besseren Kontrolle der Ausrichtung der nanofibrillären Elemente und ihrer Grenzflächen bedürfen. Hierzu gibt es im Bereich der Nanozellulose zurzeit intensive Forschungsaktivitäten.

Das Zerlegen des Holzes führt zu Holzwerkstoffen, die sich in ihren Eigenschaftsprofilen teilweise sehr stark von denen des Vollholzes unterscheiden. Das Holz in immer kleinere Einheiten zu zerlegen, kann zu Einzelkomponenten mit immer besseren mechanischen Eigenschaften führen, wie in Abbildung 5.3. für den Elastizitätsmodul dargestellt. Während Vollholz in Längsrichtung einen Elastizitätsmodul von ca. 10 GPa hat, besitzen aus dem Holz isolierte kristalline Bereiche der Zellulose einen Elastizitätsmodul von ca. 250 GPa. Um diese Eigenschaften für einen Hochleistungs-Holzwerkstoff nutzen zu können, würde es aber insbesondere einer besseren Kontrolle der Ausrichtung der nanofibrillären Elemente und ihrer Grenzflächen bedürfen. Hierzu gibt es im Bereich der Nanozellulose zurzeit intensive Forschungsaktivitäten.

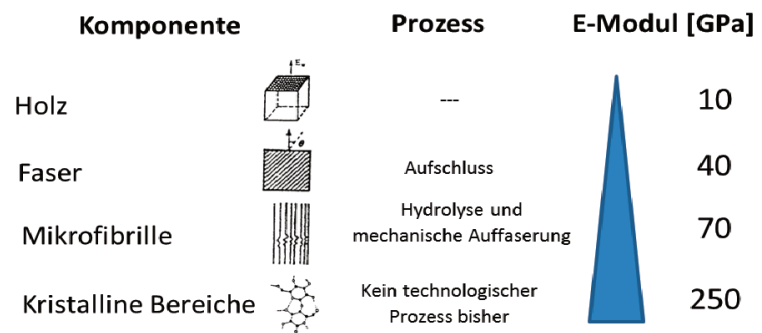


Abb. 5.3: Elastizitätsmodul Komponenten (nach: Bledzki & Gassan (1999), modifiziert)

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Bei den meisten Holzwerkstoffen ist es aber im Gegenteil so, dass Vollholz deutlich bessere mechanische Eigenschaften hat. Bei den gebräuchlichen Holzwerkstoffen besteht der Trend, dass sich mit zunehmendem Aufschluss des Holzes, und damit immer kleineren Strukturelementen, die Festigkeit des gefertigten Werkstoffes verringert, wie in Abbildung 5.4 für eine Faserplatte dargestellt.

Gleichzeitig wird durch die Zerlegung des Holzes die Homogenität des Materials erhöht und damit die Variabilität der Eigenschaften reduziert sowie der Grad der Anisotropie verringert. Zudem können in der Holzwerkstoffherstellung Eigenschaften des Holzes gezielt gefördert oder eingeschränkt werden und auf diese Weise eine Eigenschaftsoptimierung für eine bestimmte Funktion erreicht werden (z. B. Wärmedämmung mit leichten Faserplatten).

Vollholz → Holzwerkstoff

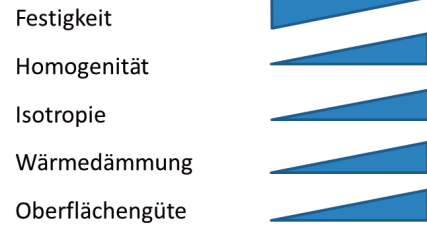


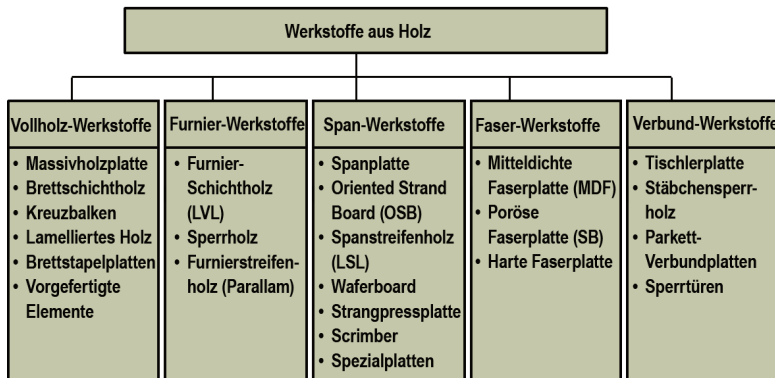
Abb. 5.4 Einfluss der Strukturauflösung auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffen (vom Schnittholz zur Faserplatte), (aus: Dunky & Niemz (2002), modifiziert).

siehe: 3.4 Thermische Eigenschaften

Ein gutes Beispiel liefert die Rohdichte der verschiedenen Holzwerkstoffe. Bei Holzwerkstoffen mit geringem Grad des Aufschlusses wie Brettschichtholz und Sperrholz liegt die Dichte im Bereich des eingesetzten Holzes. Bei Partikelwerkstoffen wie Span- oder Faserplatten kann die Rohdichte von ~150 kg/m<sup>3</sup> bis ~1050 kg/m<sup>3</sup> variiert werden.

### 5.2 Kategorien von Holzwerkstoffen

Die Einteilung der Holzwerkstoffe basiert auf der Art und Grösse der Strukturelemente, aus denen sie zusammengesetzt sind (Grad des Aufschlusses). In Abbildung 5.5 ist eine gängige Aufteilung in partikelabhängige Kategorien dargestellt.



Der Holz- und Klebstoffanteil in den einzelnen Holzwerkstoffkategorien wird sehr stark vom Grad des Aufschlusses bestimmt. Werden keine holzeigenen Adhäsionskräfte genutzt, so steigt der Klebstoffanteil mit der Verringerung der Holzpartikelgrösse (Tabelle 5.1).

Abb 5.5: Einteilung von Holzwerkstoffen.

Tab 5.1: Holz- und Klebstoff-Anteile verschiedener Holzwerkstoffe.

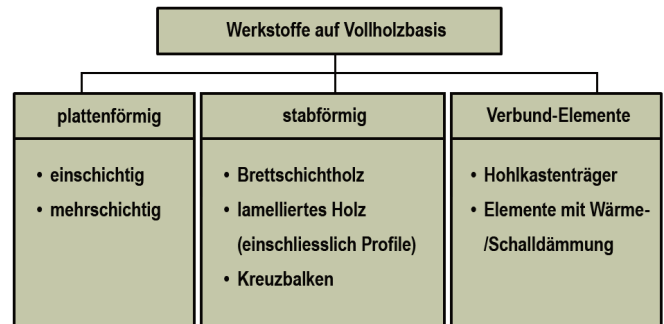
Material	Holzanteil [%]	Leimanteil [%]
Brettschichtholz	95-97	3-5
Massivholzplatte	95-97	3-5
Spanplatte	86-93	7-14
Faserplatte	86-100	0-16 (bei HDF bis 16 %, bei leichtem MDF je nach Klebstoffart z.T. deutlich höher)
Furnierwerkstoffe	20-95	5-(80) (hohe Anteile bei kunstharzimprägniertem Holz)

Die Anforderungen an die Holzqualität sind bei den verschiedenen Holzwerkstoffen sehr unterschiedlich, was mit der Nutzung der verschiedenen Holzrohstoffsortimente zusammenhängt. Allgemein sinken die Anforderungen an die Holzqualität mit steigendem Aufschlussgrad des Holzes. So sind sie bei Brettschichtholz und Lagenhölzern deutlich höher als bei Spanplatten.

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### 5.2.1 Holzwerkstoffe auf Vollholzbasis

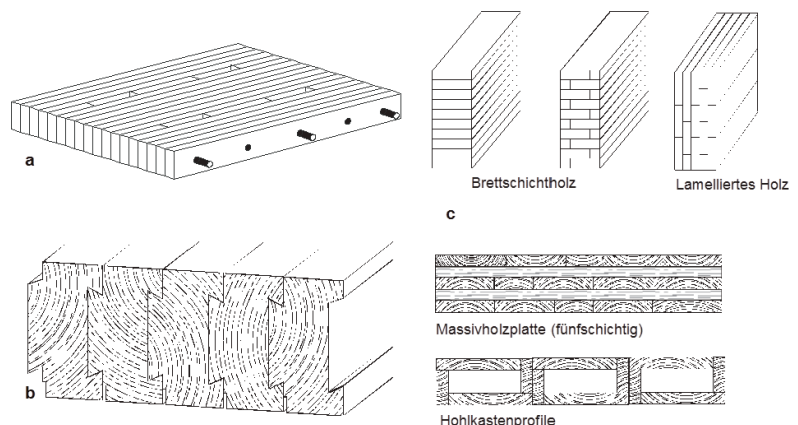
Holzwerkstoffe auf Vollholzbasis gewinnen seit dem Ende der achtziger Jahre zunehmend an Bedeutung. Gefördert wird diese Entwicklung durch die wachsende Bedeutung des Holzes als ökologischer Baustoff. Abbildung 5.6 zeigt eine Einteilung der Holzwerkstoffe auf Vollholzbasis.



Zur Gruppe der Holzwerkstoffe auf Vollholzbasis gehören:

- Massivholzplatten (ein- oder mehrschichtig, oft auch als Leimholzplatten bezeichnet; für das Bauwesen werden Platten im Format bis zu 3 m x 12 m x 0,5 m (Dicke) gefertigt. Bei einer Dicke von über 12 cm werden die Platten meist als Hohlraumkonstruktion ausgeführt).
- Elemente in Brettstapelkonstruktion (genagelt, gedübelt, geklebt, Schwalbenschwanzverbindung).
- Stabförmige, verklebte Elemente (lamelliertes Holz, Brettschichtholz, Profile; zunehmend im Bauwesen eingesetzt).
- Verbundelemente wie Hohlkastenprofile.

Abb. 5.6: Einteilung von Holzwerkstoffen auf Vollholzbasis



Holzpartikelprofile gewinnen im Holzbau als Leichtbauelemente an Bedeutung. Dabei werden die Hohlräume teilweise mit Sand (Erhöhung der Schalldämmung) oder mit Dämmstoffen (z. B. Faserdämmplatten; Erzielung einer erhöhten Wärmedämmung) ausgefüllt (Abbildung 5.7).

Abb. 5.7: Struktureller Aufbau ausgewählter Werkstoffe auf Vollholzbasis; (a) Brettstapelbauweise gedübelt, (b) Brettstapelbauweise, Schwalbenschwanzverbindung, (c) Brettschichtholz, Massivholzplatten, Hohlkastenprofile aus Holz

Die wichtigsten Einflussgrößen auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffen auf Vollholzbasis sind:

- Die Güte des eingesetzten Holzes (bei Brettschichtholz mit Festigkeitssortierung der Lamellen ist eine Anordnung der Bretter mit einer höheren Festigkeit in den Aussenlagen möglich).
- Die Art der Längsverbindung der Elemente (stumpfer Stoss, Keilzinkung).
- Der Schichtenaufbau (z.B. Verhältnis der Dicke der Decklage zur Dicke der Mittellagen bei Massivholzplatten, die Orientierung der Lagen bei Massivholzplatten).
- Die Schnittrichtung der Lagen (bei Massivholzplatten kann durch Riftschnitt (= stehende Jahrringe) die Formbeständigkeit in Plattenebene deutlich erhöht werden, da das Quell-/Schwindmass radial deutlich geringer ist als tangential).
- Technologische Parameter wie Pressdruck und Klebstoffanteil.

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### 5.2.2 Holzwerkstoffe auf Furnierbasis

Abbildung 5.8. zeigt eine Einteilung der Holzwerkstoffe auf Furnierbasis. Für Holzwerkstoffe

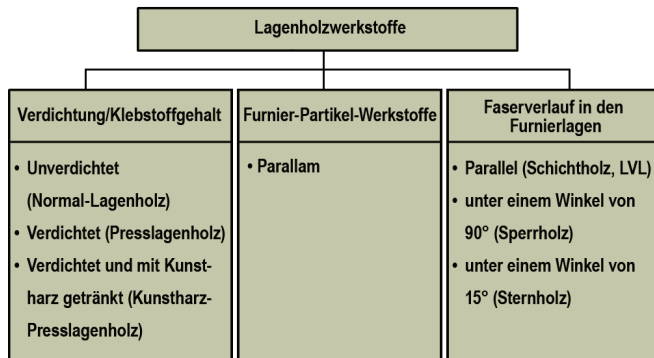


Abb. 5.8. Einteilung von Werkstoffen auf Furnierbasis

auf Furnierbasis wird in der Regel Schäl furnier genutzt, bei dem Rundholz zunächst zum Abbau von Spannungen und zur Plastifizierung gedämpft wird. Anschließend wird der Stamm in einem Prozess, der dem Dreheln ähnelt, geschält. Dabei entstehen Furniere deren Dicke variiert werden kann und meist im Bereich von ca. 1–3 mm liegt. Zur Furnierwerkstoffproduktion werden die Furnierplatten miteinander verleimt. Die Eigenschaften können durch Furnierdicke (Aufbaufaktor), Dichte und Leimgehalt wesentlich beeinflusst werden. Je nach Art der Anordnung der Furnierlagen, welche über das Eigenschaftsprofil der Platte entscheidet, entsteht Schicht, Stern- oder Sperrholz (Abbildung 5.9). Der bekannteste Vertreter dieser Holzwerkstoffkategorie ist das Sperrholz, bei dem Furnierschichten senkrecht zueinander verleimt werden, um durch diesen Sperreffekt einen weniger anisotropen Werkstoff zu produzieren. Dadurch ist die feuchteinduzierte Formveränderung deutlich geringer. Neben dem konventionellen Sperrholz werden hochverdichtete und kunstharz imprägnierte Sperrhölzer für den Formenbau hergestellt und Spezialprodukte wie Ski- und Snowboard-Kerne sowie Formteile aus Sperrholz für die Möbelindustrie und den Fahrzeugbau gefertigt.

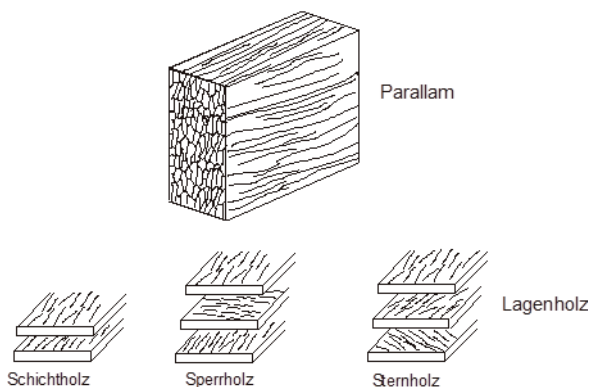


Abb 5.9: Gängige Holzwerkstoffe auf Furnierbasis (Niemz 1993)

In den letzten Jahren gewann im Bauwesen der Einsatz von Furnierschichtholz (Laminated Veneer Lumber = LVL) und Furnierstreifenholz (Parallam) an Bedeutung. Furnierschichtholz wird aus weitgehend faserparallel verklebten Furnierlagen (meist aus Nadelholz hergestelltes Schäl furnier, Furnierdicke bis ca. 3 mm) gefertigt. Teilweise werden einige Lagen senkrecht orientiert, um die Festigkeit senkrecht zur Faserrichtung der Decklagen zu erhöhen. Kertoschichtholz ist in diese Gruppe einzuordnen, welches in den Sorten Kerto S (alle Lagen faserparallel) und Kerto Q (einige Lagen senkrecht angeordnet, um die Festigkeit senkrecht zur Faserrichtung zu erhöhen) hergestellt wird. Teilweise wird bei LVL eine gezielte Materialoptimierung durch Sortierung der Furnierlagen (Aussortieren von Furnieren mit Ästen etc.) vorgenommen, so dass Elastizitätsmodul und Festigkeit von LVL die Werte von Vollholz übertreffen können.

Beim Furnierstreifenholz (Parallel Strand Lumber; PSL; Parallam) handelt es sich um einen Furnierwerkstoff, welcher aus Schäl furnier gefertigt wird. Das Furnier (ca. 3 mm dick) wird in ca. 13 mm breite und bis zu 2,5 m lange Streifen geschnitten, beleimt und zu Profilen verpresst. Das Material wird für Balken, vielfach auch für Verstärkungen, zur Aufnahme von Druckkräften, eingesetzt.

### 5.2.3 Holzwerkstoffe auf Spanbasis

Klassische Spanplatten werden heute in einer sehr grossen Variabilität und mit einem breiten Rohdichteprofil gefertigt. Dünne, nach dem Kalanderverfahren hergestellte Spanplatten und stranggepresste Spanplatten haben für Spezialzwecke einen festen Markt. Spanplatten werden aber vorwiegend flachgepresst und zunehmend in kontinuierlichen Pressen hergestellt. Sehr vereinfachend ausgeführt, werden hierbei beleimte Späne für Decklagen und Mittellage zur Fliessbildung gestreut und dann verpresst. Die Material- und Prozessparameter können dabei variiert werden, um bestimmte Rohdichte- und Eigenschaftsprofile zu erreichen.

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Holzwerkstoffe auf Spanbasis sind derzeit die weltweit dominierenden Holzwerkstoffe. Abbildung 5.10 zeigt eine Übersicht.

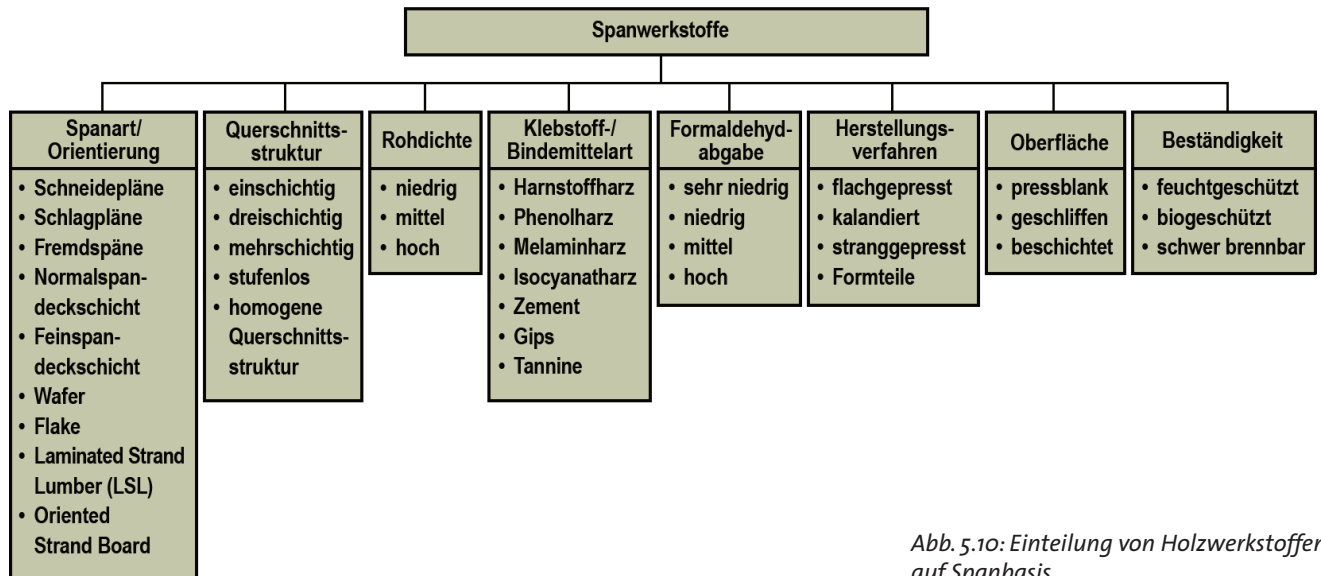


Abb. 5.10: Einteilung von Holzwerkstoffen auf Spanbasis (aus: Niemz (1993))

Klassifizierungsmerkmale sind insbesondere:

- das Herstellungsverfahren (flachgepresst, kalandergespresst, stranggepresst).
- die Oberflächenbeschaffenheit (roh, geschliffen, flüssigbeschichtet, pressbeschichtet).
- die Form (flach, profilierte Oberfläche, profilierter Rand).
- die Grösse der Teilchen (Spanplatte, grossflächige Späne (Wafer), lange schlanke Späne (OSB), andere Späne).
- der Plattenaufbau (einschichtig, mehrschichtig, etc.).
- der Verwendungszweck (allgemeine Zwecke, tragende oder aussteifende Zwecke, spezielle Zwecke).

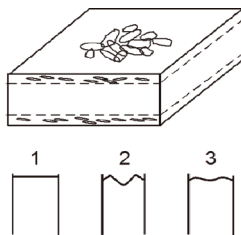


Abb. 5.11: Drei unterschiedliche Dichteprofile von Spanplatten

Neben konventionellen Spanplatten werden eine Vielzahl von Spezialplatten kundenspezifisch in kleinen Mengen gefertigt, z. B.: Platten mit reduziertem elektrischen Widerstand (Zugabe von Russ) zur Verminderung dielektrischer Aufladungen (z. B. für Fussböden in Computerarbeitsräumen), Platten mit homogener Mittelschicht für Profilierungen, extrem leichte, mit dem Flachpressverfahren hergestellte Spanplatten oder extrem dicke Platten für den Hausbau.

Ein Vertreter der Werkstoffe auf Spanbasis, welcher dem Bereich Engineered Wood Products zugeordnet werden kann, ist OSB (Oriented Strand Board). OSB wird insbesondere in den USA intensiv im Bereich Holzbau eingesetzt. Ein OSB-Spezialprodukt ist Spanstreifenholz (Laminated Strand Lumber; LSL), welches aus extrem langen (ca. 300 mm) Spänen gefertigt wird. Der Einsatz erfolgt überwiegend im Holzbau für statisch beanspruchte Elemente (Ersatz für zu konstruktiven Zwecken eingesetztes Schnittholz).

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

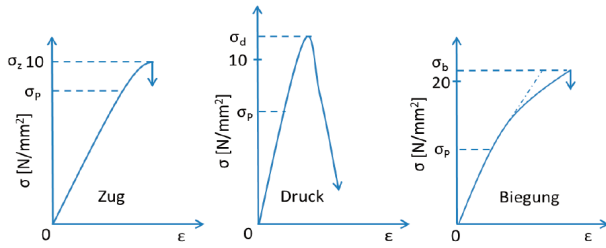


Abb. 5.12: Spannung-Dehnungs-Diagramme der Spanplatte bei Zug-, Druck-, Biegebeanspruchung in Plattenebene (aus: Niemz (1993))

Bei Betrachtung der mechanischen Eigenschaften von Spanplatten im Vergleich zum Vollholz wird die höhere Homogenität des Holzwerkstoffs deutlich. Auf Zug und Druck zeigen Spanplatten ungefähr die gleiche Festigkeit, während die Festigkeit bei Biegung ca. doppelt so hoch ist (Abbildung 5.12).

Abbildung 5.13 zeigt schematisch die Abhängigkeit der Festigkeit von der Beanspruchungsrichtung sowie von der Materialparametern und macht damit deutlich, wie Platteneigenschaften parallel und senkrecht zur Plattenebene durch die Spangeometrie, den Festharzanteil sowie die Holzdicke und die Plattendichte gesteuert werden können.

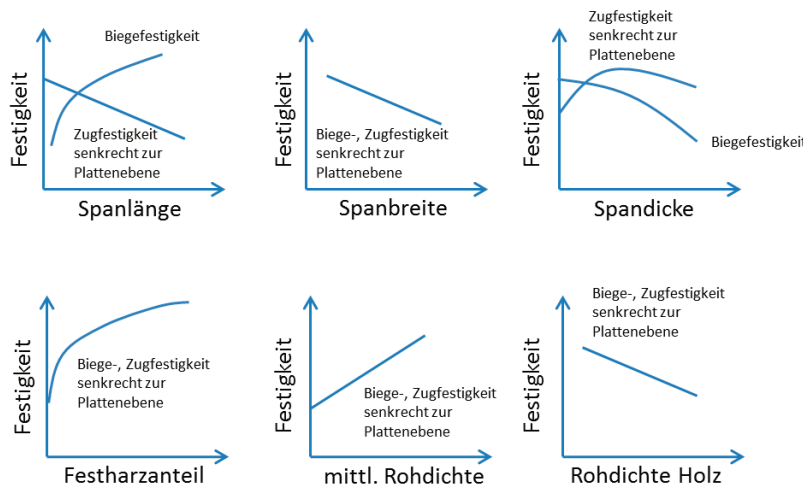


Abb. 5.13: Festigkeit von Spanplatten in Abhängigkeit von Materialparametern und Beanspruchungsrichtung

Auch die Quellung von Spanplatten ist dichteabhängig, da die Dickenquellung (senkrecht zur Plattenebene) mit zunehmender Dichte steigt. Hinzu kommt der sogenannte Spring-back Effekt aufgrund der Verdichtung des Materials im Pressvorgang, der nicht nur bei Spanplatten, sondern auch bei verdichteten Faserplatten auftritt. Daher ist die Dickenquellung von Spanplatten deutlich höher als beim Vollholz und zudem weitgehend irreversibel, während die Quellung von Vollholz reversibel ist.

### 5.2.4 Holzwerkstoffe auf Faserbasis

Eine schematische Unterteilung von Holzwerkstoffen auf Faserbasis zeigt Abbildung 5.14.

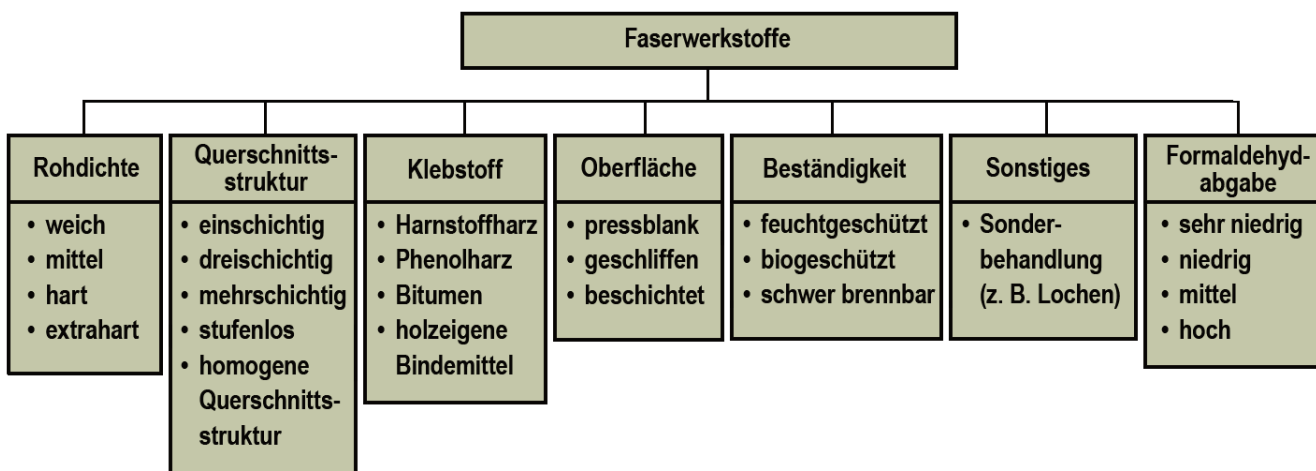


Abb. 5.14 Einteilung von Holzwerkstoffen auf Faserbasis (aus: Niemz (1993))



## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

Faserplatten werden im Nass-oder Trockenverfahren hergestellt. Harte Faserplatten (HDF) werden im Nassverfahren produziert, und haben aufgrund des Pressvorgangs, bei dem an einer Seite die wässrige Phase hinausgepresst wird, ein unsymmetrisches Dichteprofil (Abbildung 3.15). Im Trockenverfahren werden vor allen MDF-Platten (medium density fibre boards) gefertigt, die ein ähnliches Dichteprofil wie Spanplatten aufweisen. Faserdämmplatten, die eine möglichst geringe Dichte haben müssen, werden sowohl im Nassverfahren als auch im Trockenverfahren produziert.

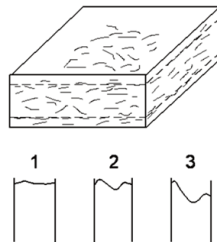


Abb. 5.15: Drei Dichteprofile von Faserplatten aufgrund verschiedener Produktionsverfahren

Dämmplatten auf Basis der MDF-Technologie können mit einer Dichte bis zu  $\sim 150 \text{ kg/m}^3$  industriell gefertigt werden, wobei Isocyanat als Bindemittel eingesetzt wird. Auf Basis der MDF-Technologie gefertigte Dämmplatten haben im Vergleich zu den nach dem Nassverfahren gefertigten Platten eine höhere Druckfestigkeit und eine verbesserte Oberflächenqualität.

Die Abhängigkeit verschiedener physikalischer und mechanischer Eigenschaften von den Materialparametern der Faserplatten ist in Abbildung 5.16 schematisch gezeigt.

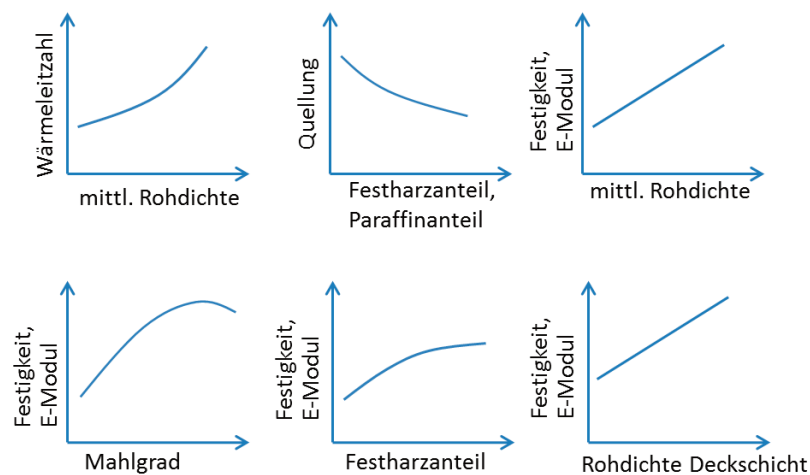


Abb. 5.16 Spezifische Eigenschaften von Faserplatten in Abhängigkeit von Materialparametern

### 5.2.5 Holzverbundwerkstoffe

Die Abgrenzung von Holzverbundwerkstoffen im Vergleich zu den anderen Holzwerkstoffkategorien ist nicht immer ganz eindeutig (z. B. Kastenprofile aus Vollholzwerkstoffen), aber generell ist eine Kombination verschiedener Holzwerkstoffe oder eines Holzwerkstoffs mit einem anderen Material (auch Holz) massgeblich. Verbundsysteme können z. B. im Bauwesen eingesetzte Träger mit Stegen aus Spanplatten und Zug- oder Druckgurten aus Furnierschichtholz oder auch Vollholz bzw. OSB sein. Auch Verbundplatten mit Kernen aus Holz und Holzwerkstoffen sowie hochfesten Decklagen können in diese Gruppe eingeordnet werden. Abbildung 5.17 zeigt eine Einteilung von Verbundwerkstoffen, die sich auf die Gestaltung der Mittellage bezieht.

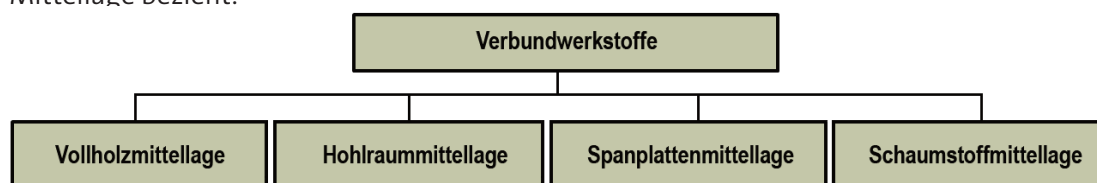
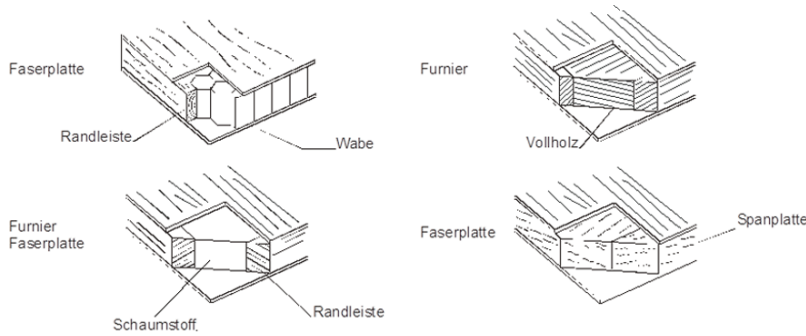


Abb.5.17: Einteilung von Verbundwerkstoffen

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe



Zumeist handelt es sich um ein mehrschichtiges Material, mit meist hochfesten Decklagen und einer Mittellage aus einem leichteren Kern, wie in Abbildung 5.18 exemplarisch für verschiedene Mittellagen gezeigt.

Abb. 5.18: Wabenplatten

Eine zunehmende Bedeutung gewinnen auch Spezialprodukte wie:

- Träger aus Holz und Holzwerkstoffen
- Verbundplatten mit Decklagen aus Holz oder Holzwerkstoffen und Kernen aus Holzwerkstoffen, Schaumstoffen oder Waben.
- OSB mit MDF (HDF)-Decklagen
- Mehrschichtig aufgebaute Parkettböden
- Lamellierte Fensterkanteln (zum Teil mit Innenlagen aus Schaumstoffen)
- Vorgespannte Bauteile aus Massivholz oder auch Holzwerkstoffen

### 5.2.6 Wood Plastic Composites (WPC)

Wood Plastic Composites (WPC) sind eine Mischung von Kunststoffen und Holzpartikeln (Späne, Fasern). Der Holzanteil liegt zwischen 5 und 95%. Die Verarbeitung erfolgt mit Anlagen der Kunststoffverarbeitung. Das Material wird für Fassadenverkleidungen, Terrassenböden, Fenster u. a. verwendet. Die gewünschten Formen werden vor allem durch Profilextrusion hergestellt und sind sehr dimensionsstabil. Allerdings gehen einige holztypische Charakteristika wie Geruch, Farbe oder haptische Eigenschaften verloren (Abbildung 5.19).



Abb. 5.19: Wood Plastic Composites (WPC) (Quelle: wikipedia.org)

### 5.2.7 Eigenschaften der Holzwerkstoffe im Vergleich

Eine vergleichende Übersicht der mechanischen und physikalischen Eigenschaften verschiedener Holzwerkstoffe findet sich in Tabelle 5.2

Tab. 5.2: Ausgewählte Kenngrößen von Holzwerkstoffen (Fa. Siempelkamp u. a.).

Eigenschaften	Holzwerkstoffe						
	Spanplatte	MDF	OSB	LVL	LSL	Massivholzplatte	PSL
Rohdichte [kg/m³]	680-700	760-790	660-700	660-700	650	450	660
E-Modul [N/mm²]	2600-3200	4000-4500	---	12000	12000	---	14000-15500
parallel	---	---	7000	---	---	5000-7000	---
senkrecht	---	---	1850	---	---	1000-3000	---
Biegefestigkeit [N/mm²]	20-22	33-38	---	---	---	---	---
parallel	---	---	36	---	---	30-50	60-65
senkrecht	---	---	20-25	---	---	10-30	---
Schubmodul [N/mm²]	---	---	---	---	---	---	---
flach	100-180	100-200	ca. 300	ca. 500	---	ca. 200	700-800
hochkant	1000-1500	600-1000	1100	ca. 500	ca. 2300	600-700	---

## Teil 2 – Holz und Holzwerkstoffe

### 5.3 Engineered Wood Products

Unter Engineered Wood Products wird eine Gruppe von Holzwerkstoffen verstanden, die primär dem Ersatz von Vollholz im Bauwesen dient. Sie werden als stabförmige (überwiegend Scrimber, Parallam) oder auch flächige Elemente (LSL, LVL) angeboten, welche auch zu stabförmigen Elementen aufgetrennt werden können. Strukturell handelt es sich dabei um Weiterentwicklungen von bekannten Werkstoffen auf der Basis von Spänen (LSL) oder Furnieren (LVL, PSL). Für diese Holzwerkstoffe gelten weitgehend die wissenschaftlichen Grundlagen von Spanplatten und Lagenholz. Vorteile im Vergleich zum Vollholz sind:

- Sehr grosse und variable Abmessungen (insbesondere Längen), da Endlosfertigung möglich
- Höhere Dimensionsstabilität
- Teilweise höhere Festigkeit und Steifigkeit als Vollholz, da Bereiche mit Defekten (wie Äste, Faserabweichungen) im Herstellungsprozess aussortiert werden können

Die unter der Bezeichnung Engineered Wood Products gefertigten Produkte werden überwiegend mit Phenolharz oder Isocyanat feuchtebeständig verklebt. Tabelle 5.3 zeigt ausgewählte strukturelle Parameter von Engineered Wood Products.

Tab. 5.3: Typische Strukturmerkmale von Engineered Wood Products

Produkt	Beschreibung	Abmessungen			Anwendung
		Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	
OSB (Spanwerkstoff)	lange Späne	75-100	5-30	0.3-0.65	Platten
LSL (Spanwerkstoffe)	extra lange Späne	300	25	0.8-1	Platten (bis 140 mm Dicke), Profile, Balken
Structure Frame (Spanwerkstoff)	Wafer	20-30	20-30	1	Platten
Scrimber (Spanwerkstoff)	durch Quetschen gefertigte Partikel	---	---	---	Balken
LVL (Lagenholz)	Furnierlagen	---	---	2.5-4	Platten, Balken
PSL (Lagenholz)	Furnierstreifen	---	13	0.6-2.5	Balken
COM-PLY (Verbundwerkstoff)	Spanplatte, beplankt mit Schichtholzlagen	---	---	---	Balken