

---

# Holz und Holzwerkstoffe

**Skript zur Vorlesung Werkstoffe I  
(Materialeigenschaften)**

**Teil Holz und Holzwerkstoffe**

**Prof. Dr. Ing. habil. Peter Niemz  
Institut für Baustoffe**

Februar 2011

# Inhaltsverzeichnis

## **Kapitel I Einführung**

## **Kapitel II Aufbau des Holzes und der Holzwerkstoffe**

1. Anatomischer Aufbau des Holzes
2. Holzwerkstoffe

## **Kapitel III Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe**

1. Koordinatensystem
2. Dichte
3. Holzfeuchte/Quellen und Schwinden
4. Thermische Eigenschaften
5. Elastische Eigenschaften
6. Festigkeitseigenschaften
7. Rheologische Eigenschaften

## **Kapitel IV Übungsaufgaben**

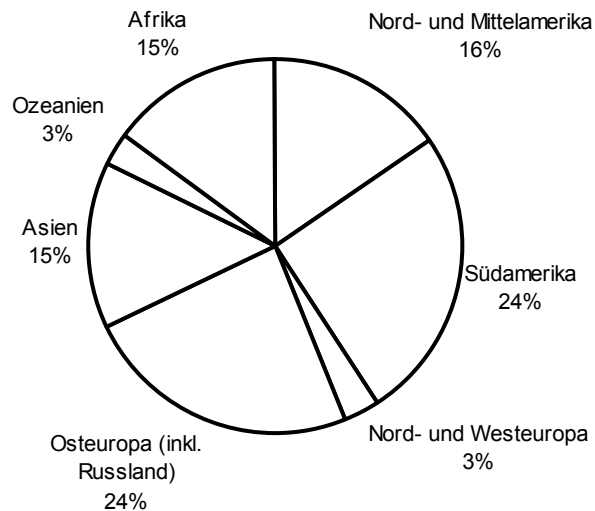
## **Kapitel V Weiterführende Literatur**

## Lernziele

Holz ist ein wichtiger Baustoff. Aufbauend auf einer Erläuterung des strukturellen Aufbaus von Holz und Holzwerkstoffen, werden wesentliche materialwissenschaftliche Grundlagen für den Einsatz von Holz und Holzwerkstoffen im Bauwesen vermittelt. Den Schwerpunkt bilden dabei die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Holzes und der Holzwerkstoffe.

# KAPITEL I: Einführung

Die Konkurrenz der Baumaterialien ist gross. Seit ein paar Jahren verzeichnet der Holzverbrauch im Bauwesen wieder deutliche Zuwachsraten, gleichwohl er prozentual gesehen immer noch einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtmenge aufweist. Eine Reihe von Gründen sprechen für den vermehrten Einsatz von Holz: So entsteht kein Alternativprodukt so umweltschonend wie das Holz. Ein Blick in verschiedene Statistiken zeigt die ungeheuren Möglichkeiten dieses nachwachsenden Rohstoffes. Weltweit existieren etwa 3,5 Mrd. ha Wald, die grössten Anteile davon finden sich in Osteuropa und Südamerika (Abbildung 1). Nord- und Westeuropa besitzen gemeinsam nur etwa drei Prozent der weltweiten Waldgebiete. 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, ein Anteil der in den vergangenen Jahrzehnten immer weiter gestiegen ist.



**Abbildung 1:** Waldflächenverteilung weltweit (Quelle: state of the world's forests, FAO 1999)

Nutzbare Wälder gibt es in ganz Europa (ohne Russland) etwa 150 Mio Hektar. Das entspricht einem nutzbaren Gesamtvorrat von 21,4 Milliarden m<sup>3</sup>. Jedes Jahr wachsen in diesem Gebiet neu 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. In der Schweiz, die über eine Fläche an nutzbaren Wäldern von 1,06 Mio. ha. verfügt, sind es immerhin noch über 5 Mio. m<sup>3</sup>, eine Zahl die seit vielen Jahrzehnten stetig ansteigt (Zahlen: Forest Resources of Europe, UN ECE/FAO 2000, Main Report). Das bedeutet, dass in der Schweiz (wie auch in Deutschland) jährlich mehr Holz nachwächst als genutzt wird. Für die Schweiz und viele andere Länder in Europa gilt in der Forstwirtschaft schon lange der Grundsatz der Nachhaltigkeit (nicht mehr ernten als produziert wird), was eine Nutzung der Ressource Holz auch noch weit in der Zukunft garantiert.

Wofür das geerntete Holz genutzt wird, hat sich im vergangenen Jahrhundert aber stark geändert (Tabelle 1). Waren 1920 noch über die Hälfte des Holzschlags für die Brennholzproduktion genutzt worden, so überwiegt heute die Stammholzproduktion (z.B. Balken, Bretter), und der Anteil des Industrieholzes (z.B. für Zellstoff- und Faserplattenproduktion) nimmt immer mehr zu.

**Tabelle 1:** Entwicklung der Nutzung der Schweizer Wälder. Angaben in 1000 m<sup>3</sup>.  
(Quelle: Schweizerischer Forstkalender 2003. Anhang. Verlag Huber Frauenfeld)

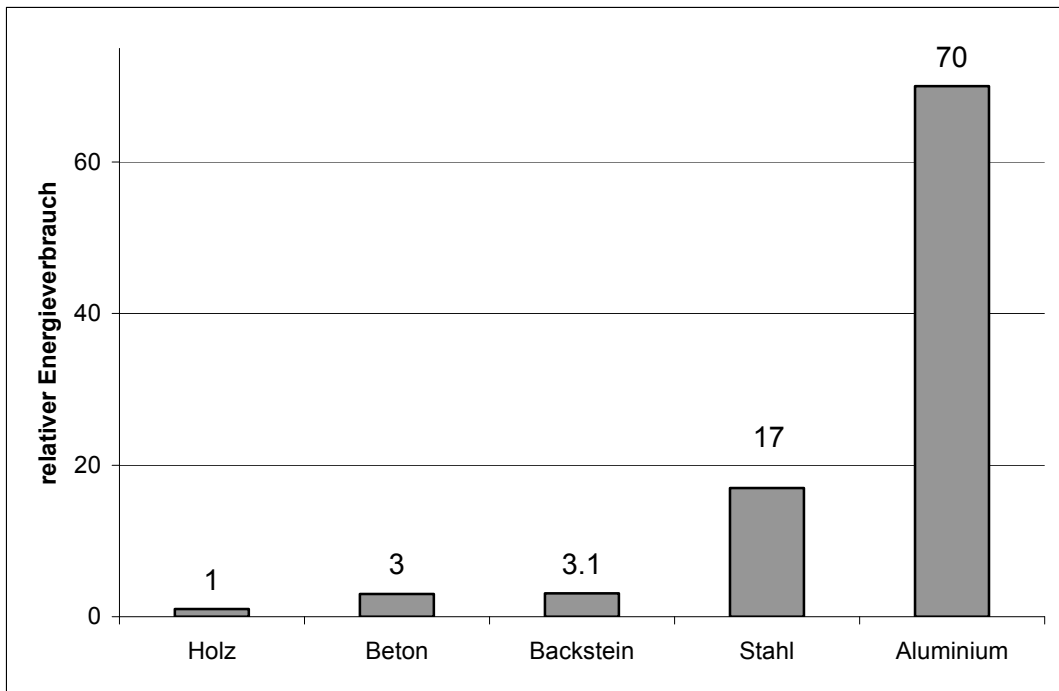
Jahr	Stammholz	Industrieholz	Brennholz	Gesamtmenge
1920	1340	0	1990	3330
1930	1360	0	1490	2850
1940	1600	0	2200	3800
1950	1455	290	1600	3345
1960	1815	480	1320	3615
1970	2418	784	717	3919
1980	2877	689	809	4384
1990	4488	895	879	6262
2000	6801	811	1626	9238

Trotz dieser Entwicklung ist der Brennholzanteil in der Schweiz im Vergleich mit anderen Industrienationen immer noch sehr hoch (1992: Schweiz 19%, Deutschland 12%, Finnland 8%, Kanada 4%; Quelle: FAO Yearbook of Forest Products 1992). Ökologisch gesehen ist das Heizen mit Holz als sinnvoll anzusehen, da Holz ausschliesslich aus gespeicherter „sauberer“ Sonnenenergie besteht, die zur Wärmeengewinnung wieder freigesetzt wird und dessen verbrauchte Biomasse im Unterschied zu fossilen Energieträgern wieder nachwächst. Inzwischen existieren Holzfeuerungsanlagen mit hohem Wirkungsgrad, so dass sich das Heizen mit Holz auch finanziell lohnen kann. Besonders die automatische Heizung mit Holz hat sehr stark zugelegt (Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Entwicklung der Holzenergienutzung in der Schweiz in TJ.  
(Quelle: Schweizerische Statistik der Erneuerbaren Energien 2001; Bundesamt für Energie)

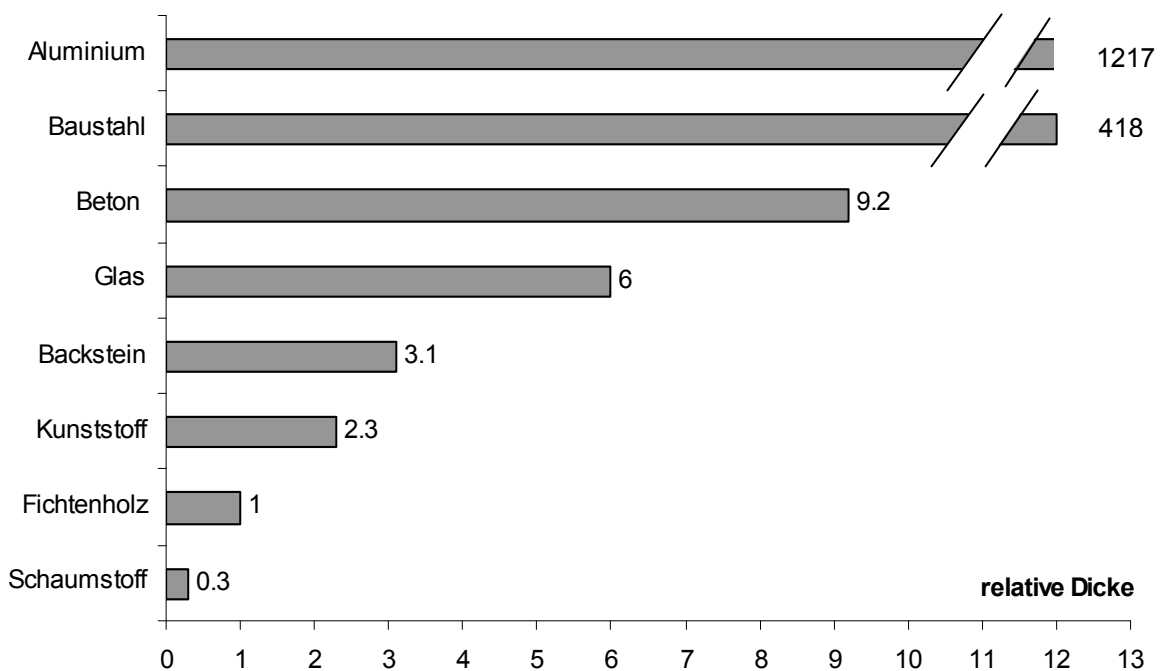
	1990	1995	2001
Einzelraumheizung mit Holz	2727	3127	3088
Gebäudeheizung mit Holz	3388	2273	2766
Automatische Feuerungen mit Holz	2831	4517	6125
Feuerungen mit Holzanteilen	652	1259	1132
Holzkohlenutzung	0	0	0

In einem Kubikmeter Holz sind durchschnittlich 255 kg Kohlenstoff gespeichert, was einem CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 0,935 Tonnen entspricht. Die Verwendung von Holz oder Holzprodukten im Bauwesen trägt also erheblich zur langfristigen C-Speicherung bei und hilft, die Ziele der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen in Kyoto, 1997, nämlich die Emission an Treibhausgasen, zu denen CO<sub>2</sub> massgeblich beiträgt, weltweit um 5,2% zu reduzieren und so den negativen Auswirkungen durch die Klimaveränderung entgegenzuwirken. Die Verwendung von Holz hilft aber auch schon bei der Produktion Energie zu sparen und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoss gering zu halten. Vergleicht man den mittleren Energieverbrauch, um die gleiche Menge Werkstoff zu produzieren, fallen Produkte aus Aluminium mit einem um 70-fach höheren Wert weit vom Holz ab (Abb. 2). Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass durch die abweichenden Materialeigenschaften meist deutlich weniger Material an Aluminium oder Stahl benötigt wird, um die gleiche statische Leistung zu erbringen.

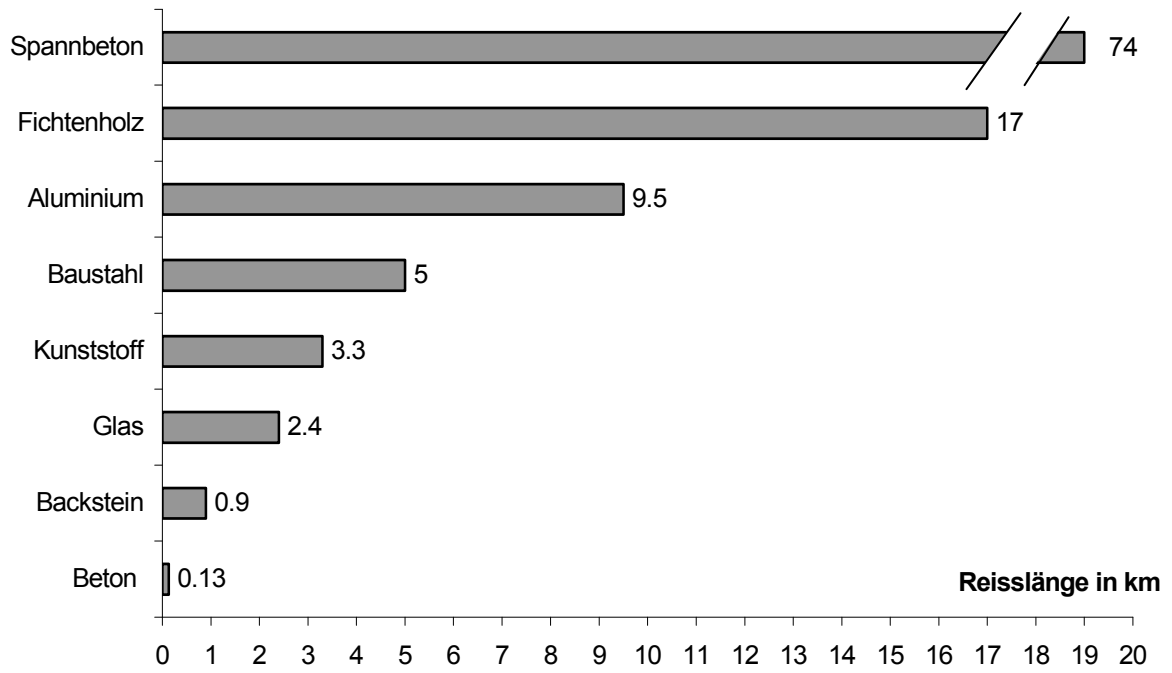


**Abbildung 2:** Mittlerer relativer Energieverbrauch (Holz = 1) ausgewählter Rohstoffe zur Herstellung pro Tonne Fertigprodukt. (Quelle: Corrim Report 1976; Koch 1991)

Bei einigen Materialeigenschaften wie dem E-Modul kann Holz also nicht die Werte der Konkurrenz-Baustoffe erreichen. Andere Eigenschaften wie Wärmedämmung oder Reisslänge dagegen bringen Holz auf die vorderen Plätze und zeigen seine Vielseitigkeit (Abbildung 3 und Abbildung 4). So ergibt sich für Holz eine Reisslänge von 17 km, ein Wert, der von den Konkurrenzmaterialien nur von Spannbeton übertroffen wird. Ähnlich gut steht Holz bei der Wärmedämmung da: Nur Schaumstoff, der sich aber nicht als Konstruktionsmaterial eignet, erreicht bessere Werte.



**Abbildung 3:** Relative Schichtdicke ausgewählter Baustoffe mit gleicher Wärmedämmung. (Quelle: Dubbel 1974)



**Abbildung 4:** Reisslänge ausgewählter Baustoffe. (Quelle: Dubbel 1974)

# KAPITEL II: Aufbau des Holzes und der Holzwerkstoffe

## 1. Anatomischer Aufbau des Holzes

### 1.1 Der Makroskopische Holzaufbau

#### Schnittebenen des Holzes

Holz ist ein Naturprodukt und entsprechend den Anforderungen des Baumes bezüglich seiner Stabilität, seines Wachstums und seiner Versorgung aufgebaut. Das bedeutet, dass es sich bei Holz nicht um ein homogenes und isotropes Material handelt. Ganz im Gegenteil: Der axiale Aufbau des Stammes wie auch der Äste und Wurzeln spiegelt sich im Holzaufbau wider. Ein Grossteil der Strukturen folgt diesem axialen Verlauf (Faser-Grundgewebe, Wasserleitungsbahnen) und nur ein geringer Prozentsatz der Zellstrukturen (Holzstrahlen) weist eine radiale Ausrichtung aus.

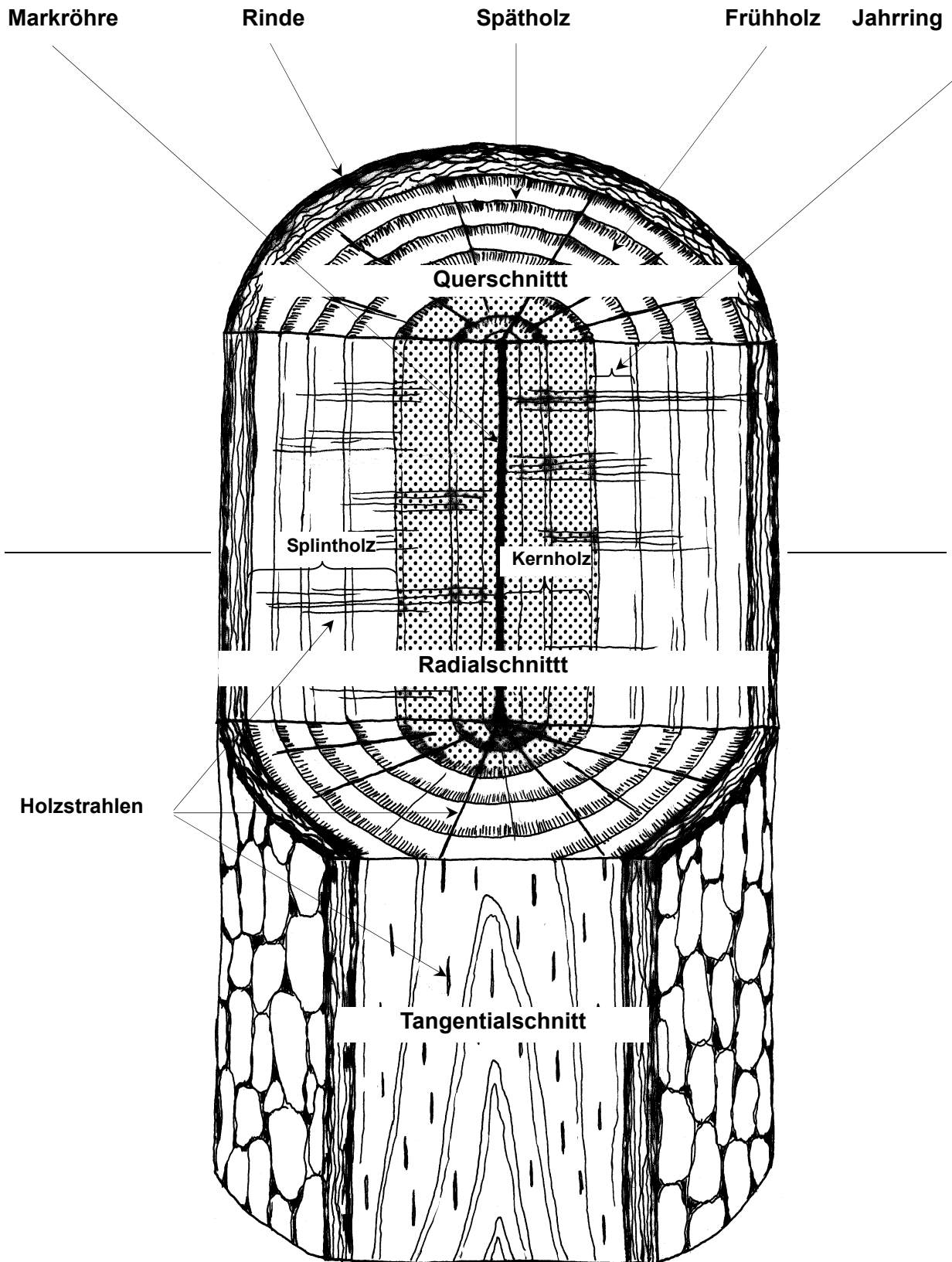
Im Unterschied zu vielen anderen mehrjährigen Pflanzen wachsen Bäume jedes Jahr um eine gewisse Distanz in die Breite (Dickenwachstum). Ein Zellkranz aus lebenden Zellen, das Kambium, befindet sich nur wenige Zentimeter unter der Baumrinde und ist für dieses Dickenwachstum verantwortlich. Nach innen bilden diese Kambialzellen Holzzellen (Xylem). Die jeweiligen Holzabschnitte, die innerhalb eines Jahres entstehen, nennt man Jahrringe. Der Holzkörper ist für die Stabilität des Baumes, für die Speicherung von Nähr- und Reservestoffen sowie für den Transport von Wasser aus den Wurzeln verantwortlich. Die vielfältigen Aufgaben des Holzkörpers finden sich in der Anatomie des Holzes wieder. Nach aussen bildet das Kambium Bastzellen (Phloem). Dieser äussere Zellkranz dient dem Transport von Zuckern und Nährstoffen, die in der Krone des Baumes produziert werden und ist nur sehr schmal.

Bei der Betrachtung des Holzes unterscheiden wir drei Schnittebenen, die jeweils unterschiedliche charakteristische Aspekte des dreidimensionalen Holzkörpers aufzeigen (siehe Abbildung 5). Nur eine Kombination aller drei Ebenen ermöglicht uns ein vollständiges Bild der jeweiligen Holzstruktur. Auch für die Beurteilung und Bestimmung von Holzeigenschaften ist die Einteilung in diese verschiedenen Schnittrichtungen von Bedeutung. Wegen seines anisotropen Aufbaus ändern sich die Eigenschaften des Holzes je nach Belastungsrichtung.

**Querschnitt:** der Querschnitt eines Baumstammes hat im Normalfall eine annähernd kreisrunde Form. Die jüngsten Teile des Baumes befinden sich im Inneren. Zentral liegt die Markröhre. Die einzelnen Jahrringe des Baumes sind mit blossem Auge als konzentrische Ringe zu erkennen. Der Querschnitt weist eine netzförmige Textur auf, da das dominierende axiale Gewebe durchtrennt ist. Die Holzstrahlen verlaufen von Innen nach Aussen über die Jahrringgrenzen hinweg.

**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 die Kreuzung der axialen und radialen Gewebe. Die Holzstrahlen verlaufen in horizontaler Richtung.

**Tangentialschnitt:** Er entsteht, wenn wir den Längsschnitt im äusseren Bereich des Stammsegments setzen. 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 Querschnitt zu sehen sind. Je nach Breite der Holzstrahlen kann man längs verlaufende Streifen oder Spindeln erkennen.



**Abbildung 5:** Die drei Schnittebenen des Holzes und die wichtigsten Strukturelemente am Beispiel eines Nadelholzstammes.



## Splintholz und Kernholz

Im Holz der Bäume wird das Wasser von den Wurzeln bis hinauf in die Krone transportiert, um dort für die Energieproduktion zur Verfügung zu stehen (Photosynthese). Ältere Bäume benutzen aber nicht den gesamten Holzkörper für die Leitung von Wasser, sondern nur die jüngeren Jahrringe. Wie viele Jahrringe das sind, hängt stark vom Typus der Leitungsbahnen und damit 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. Im engeren Sinne wird dieser Begriff jedoch nur für solche Holzarten verwendet, deren innerer Holzkörper farblich vom Splintholz abweicht, im Regelfall also dunkler erscheint. Es gibt aber auch Baumarten mit heller Verkernung, wie Fichte, Birke, Tanne, Weide, wo sich Splint und Kern farblich gleichen. Ausserdem gibt es Baumarten, die man als fakultative Kernholzbildner bezeichnet. Diese Baumarten, zu denen Esche, Buche und Pappeln gehören, weisen im Normalfall einen hellen Kern auf, unter bestimmten Umständen kann sich jedoch ein Farbkern ausbilden. Der Umriss eines solchen fakultativen Farbkerns ist dann meist nicht wie der der obligaten Kernholzbildner mit einer Jahrringgrenze identisch, sondern weist einen unregelmässigen Umriss auf.

Typische Baumarten mit obligater Kernholzbildung sind Föhre, Douglasie, Eiche und Ulme. Die Bäume wandeln in komplexen biochemischen Prozessen (Hydrolyse von Stärke, oxidative Polymerisation etc.) Splint- in Kernholz um. Es kommt zu Verfärbungen, Einlagerungen und bei einigen Laubbäumen zu Verthyllungen der entsprechenden Holzbereiche. Durch diese Prozesse wird das Holz gegen den Abbau von Mikroorganismen besser geschützt und erreicht eine deutlich höhere Dauerhaftigkeit.

## Jahrringe und Zuwachszonen

In Gebieten mit ausgeprägten Jahreszeiten sind die jährlichen Zuwächse an Holz in Form von Jahrringen sehr gut erkennbar. Die Bäume zeigen ein periodisches Wachstum, das eng an Temperatur und Wasserversorgung gekoppelt ist, und setzen ihr Dickenwachstum im Winter ganz aus. Das Holz, das zu Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr gebildet wird, ist sehr locker und porenreich. Der Baum legt zu Beginn des Jahres seine Prioritäten auf die Wasserleitung. In Nadelhölzern bedeutet das weitlumige Tracheiden, also Zellen mit dünnen Wänden und grossem Porenvolumen. Im Laubholz wird dies durch eine hohe Zahl oder besonders grosse Durchmesser der Gefässe, also der Zellen, die für die Wasserleitung zuständig sind, erreicht. Diese zu Jahresbeginn gebildeten Holzabschnitte bezeichnet man als Frühholz.

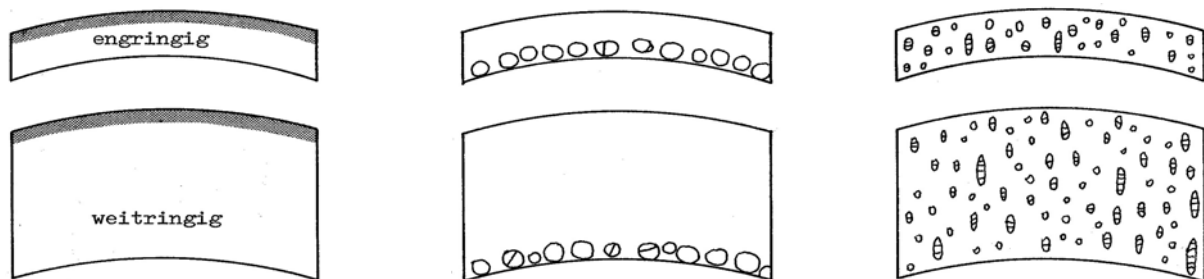
Zum Ende der jährlichen Dickenwachstumsphase der Bäume, im Spätsommer oder Herbst, ändern sich die Prioritäten. Die Wasserleitung tritt in den Hintergrund und die Festigkeitseigenschaften der Holzzellen wird wichtiger. Deshalb bilden viele Bäume in den letzten Zellreihen des Jahrrings Zellen aus, die besonders dicke und ligninreiche Wände besitzen, aber kaum noch Wasser transportieren können. Für Laubbäume bedeutet das, dass die Anzahl der Gefässe zurückgeht und die Durchmesser stark abnehmen können. Das Spätholz ist dadurch deutlich dichter als das Frühholz. Die beiden Abschnitte kann man besonders bei Nadelhölzern auch farblich gut unterscheiden.

Das hellere Frühholz macht in einem Durchschnittsjahr mindestens 4/5 der Jahrringbreite aus. Das rötliche bis dunkelbraune Spätholz ist meist nur ein schmaler Ring. Der Anteil des Spätholzes steigt aber, wenn Stressbedingungen (z.B. Trockenheit) ein gutes Dickenwachstum verhindern. In Extremfällen kann ein Jahrring so schmal sein, dass man ihn mit blossen Auge nicht mehr erkennt und besteht dann nur noch aus einigen wenigen Spätholzzellen. Die Breite der Jahrringe, der Anteil des Spätholzes und die Regelmässigkeit des Dickenzuwachses können die Holzeigenschaften massgeblich beeinflussen.

In Gebieten ohne ausgeprägte Jahreszeiten kommt es meist nicht zur Ausbildung von Jahrringen. Die Bäume finden das ganze Jahr über gute Wachstumsbedingungen vor und können theoretisch zwölf Monate im Jahr Dickenwachstum betreiben. Trotzdem kann man auch in den Hölzern dieser tropischen Gebiete Zuwachszonen erkennen. Sie spiegeln Wachstumsphasen wider, die aber nicht mit Jahren korreliert sind und deshalb nichts über das Alter der Bäume aussagen.

## Porigkeit

Auch ohne Mikroskop sind im Holzquerschnitt zum Teil Poren erkennbar (Abbildung 6). Dies trifft nicht für die Nadelhölzer zu, da der Durchmesser der Tracheiden zu klein ist und diese selbst mit Lupe nur selten zu sehen sind. Die „Löcher“ die man im Holz der Nadelbäume makroskopisch erkennen kann, sind Harzkanäle. Harzkanäle sind ein Instrument zum Schutz des Holzes z.B. für die Abwehr von Borkenkäfern. Das in den Kanälen enthaltene Harz verklebt die Insekten. Die Föhren verfügen über viele Harzkanäle, besonders im Spätholz, Tanne und Eibe dagegen weisen im gesunden Holz keine Harzkanäle auf.



**Abbildung 6:** Muster in der Jahrringbildung von Nadelhölzern (links), ringporigen (Mitte) und zerstreutporigen (rechts) Laubhölzern. Die obere Zeichnung stellt jeweils einen sehr engen, die untere einen breiten Jahrring dar.

Die Laubhölzer verfügen über spezielle Zellen, die für die Wasserleitung verantwortlich sind. Diese axial verlaufenden Zellen werden Gefässe genannt und besitzen einen deutlich grösseren Durchmesser als die Fasern des Grundgewebes, so dass sie teilweise schon mit blossem Auge, auf jeden Fall aber mit der Lupe, erkennbar sind. Man unterteilt die Laubhölzer je nach Grösse und Anordnung der Gefässe in zwei Hauptgruppen: Zerstreutporer und Ringporer. Die Zerstreutporer besitzen mittelgrosse Gefässe, die über den gesamten Jahrring annähernd gleichmässig verteilt sind und in ihrem Durchmesser weitgehend konstant bleiben. Die Ringporer dagegen weisen im Frühholz 1-3 sehr grosse Gefässe, die einen Durchmesser von über einem halben Millimeter besitzen können, im weiteren Verlauf des Jahrrings jedoch nur noch einige kleine bis mittelgrosse Spätholzgefässe auf. Strukturell ergibt sich deshalb im Querschnitt ein deutlich sichtbarer Ring aus Frühholzporen, der für diese Holzgruppe namensgebend war. Ähnlich wie der Spätholzanteil der Nadelbäume bleibt die Breite der Frühholzgefässe auch bei sich ändernden Jahrringbreiten weitgehend konstant (vergleiche Abbildung 6).

In unseren Breiten überwiegt der Typus Zerstreutporer. Lediglich die Baumarten Eiche, Ulme, Robinie, Esche und Edelkastanie haben ein ringporiges Holz. In den Tropen kehrt sich dieses Verhältnis um und fast alle Baumarten besitzen ein ringporiges Erscheinungsbild. 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 Leitungsbahnen (Embolien) auf Grund von Wassermangel oder Lufteinbruch.

## Reaktionsholz

An Stämmen von Nadel- und Laubbäumen, die geneigt bzw. starken Windbelastungen ausgesetzt sind, findet man genauso wie an Ästen einen besonders ausgeformten Holztyp, das Reaktionsholz. Dieses hat die Aufgabe, die ursprüngliche Wachstumsrichtung von Ast und Stamm beizubehalten bzw. wiederherzustellen. Die Ausbildung von Reaktionsholz führt oft zu einer einseitigen Förderung des Wachstums: der Stamm- bzw. Astquerschnitt ist nicht mehr rund, sondern exzentrisch geformt.

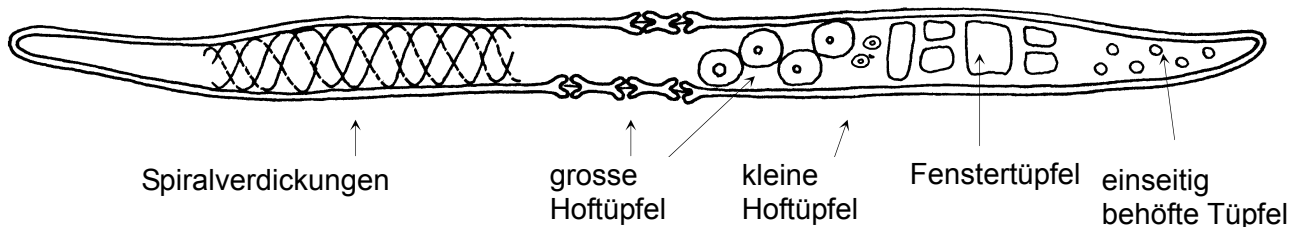
In Nadelbäumen wird das Reaktionsholz auch Druckholz genannt, da es an der der Belastung abgewandten Seite (Lee-Seite) den Stamm oder Ast in die entsprechende Richtung „drücken“ soll. In den Laubbäumen dagegen wird das Reaktionsholz an der Luv-Seite der Belastung, also z.B. auf der Astoberseite, gebildet und entsprechend Zugholz genannt. Die Zellen des Reaktionsholzes weichen

von den „normalen“ Fasern in Aufbau und Zusammensetzung etwas ab und verändern dadurch auch entscheidend die Holzeigenschaften. Die Folge sind entsprechende Schwierigkeiten und Einschränkungen bei Bearbeitung und Verwendung von Stammholz mit Reaktionsholzanteilen.

## 1.2 Mikroskopischer Aufbau von Nadel- und Laubholz

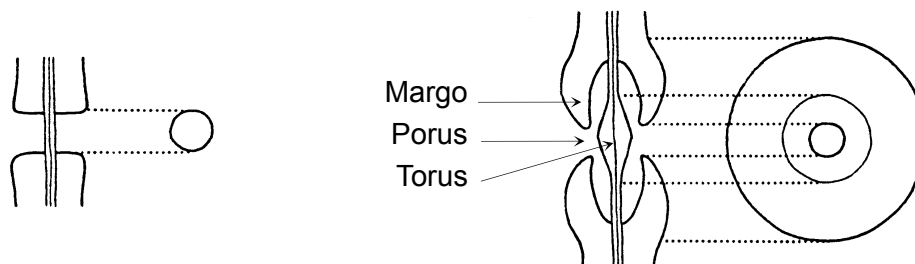
### Nadelholz

Das Nadelholz besteht aus nur zwei Zelltypen. Den Hauptanteil nehmen dabei die Tracheiden (90 - 95%), den Rest Parenchymzellen ein. Im Gegensatz zum Laubholz besitzt das Nadelholz also nur wenige Zelltypen, die dafür in der Lage sind, mehrere Funktionen auf einmal zu übernehmen. Die Tracheiden sind „Alleskönner“ und sowohl zur Wasserleitung fähig, als auch für die mechanische Stabilität von Nadelholz verantwortlich. Die Tracheiden sterben schon bald nach ihrer Entstehung ab und sind in Funktion stets tot. Die Längstracheiden (Abbildung 7) sind axial verlaufende, langgestreckte Zellen, die im Inneren ein Lumen besitzen, also „hohl“ sind. Das im Lumen transportierte Wasser kann über Verbindungen zwischen den Tracheiden, sogenannte Tüpfel, weitergeleitet werden.



**Abbildung 7:** Schematische Darstellung einer Frühholztracheide mit verschiedenen Tüpfelarten und schraubenförmigen Verdickungen.

Die Verbindung zwischen zwei Tracheiden nennt man Hoftüpfel (Abbildung 8). Sie besitzen einen auf Druckunterschiede reagierenden Schliessmechanismus. Ein Deckplättchen (Torus) ist im Tüpfelinneren (Porus) an aus Zellulose bestehenden Margofäden aufgehängt. Kommt es zu einem Luft-einbruch in das Wasserleitsystem wird der Torus durch den entstehenden Unterdruck auf den Porus gedrückt und verschliesst so die Zellverbindung ohne Energieaufwand.



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der Tüpfelarten zwischen zwei Zellen. Links: einfacher Tüpfel. Rechts: Hoftüpfel.

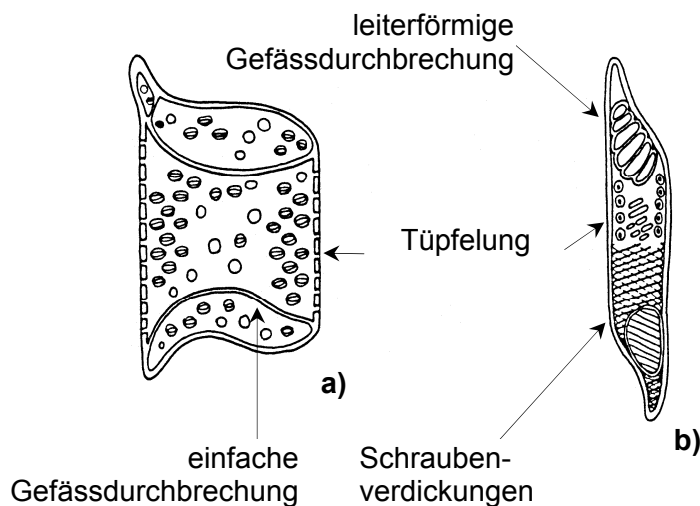
Die Spätholztracheiden sind etwas englumiger und dickwandiger als die Frühholztracheiden. Neben den Längstracheiden existieren in einigen Baumarten auch Quertracheiden. Sie befinden sich an den oberen oder unteren Enden der Holzstrahlen. Die Holzstrahlen sind Zellverbände, die in radialer Richtung den Holzkörper durchziehen.

Der zweite wichtige Zelltyp des Nadelholzes ist die Parenchymzelle. Diese Zellen sind im Splintholz stets lebend und haben die Hauptaufgaben Beladung, Speicherung und Entladung von Reservestoffen. Die Länge der Parenchymzellen ist meist deutlich geringer als die der Tracheiden. Die Holzstrahlen bestehen zum überwiegenden Teil aus Parenchymzellen. Die Parenchymzellen sind untereinander mit einfachen Tüpfeln verbunden (Abbildung 8). Zwischen den Parenchymzellen und den Tracheiden existieren ebenfalls Tüpfelverbindungen, die eine besondere Form haben können (Bsp. Fenstertüpfel bei Föhrenarten; Abbildung 7). Auch in den Harzkanälen befinden sich Parenchymzellen. Sie werden Epithelzellen genannt und sind in der Lage, Harz auszuscheiden.

## Laubholz

Im Gegensatz zum Nadelholz gibt es beim Laubholz viele verschiedene Zelltypen und damit eine Arbeitsteilung. Das wiederum axial verlaufende Grundgewebe besteht aus Fasern. Je nach Entwicklungstyp handelt es sich um Libriformfasern, Fasertracheiden oder vasizentrische Tracheiden, wobei in einer Holzart auch mehrere Fasertypen vorkommen können. Der am weitesten differenzierte Fasertyp ist die Libriformfaser. Sie ist ausschliesslich für die Festigkeit zuständig. Die Fasertracheide dagegen ist wie bereits der Name verrät, funktionell der Nadelholz-Tracheide noch sehr ähnlich und übernimmt neben Festigkeits- auch Wasserleitungsaufgaben.

Der Hauptteil der Wasserleitung erfolgt jedoch, wie bereits erwähnt, über die Gefässe. Ein Gefäss kann im Falle einer ringporigen Baumart bis zu mehreren Metern lang sein und besteht aus einer Vielzahl von Gefässgliedern, die nur wenige Zehntel Millimeter lang sind (Abbildung 9). Die Gefässglieder sind entweder unten wie oben völlig offen (einfache Gefässdurchbrechung) oder sind mit einer leiterförmigen Gefässdurchbrechung verbunden, so dass das Wasser auf einfache Art und Weise transportiert werden kann. Zusätzlich gibt es einen horizontalen Wassertransport über intervaskuläre Tüpfel. Die Gefässglieder besitzen eine recht dünne, vergleichsweise stark lignifizierte Zellwand und sind wie die Fasern bei Beginn ihrer Funktionserfüllung bereits tot.

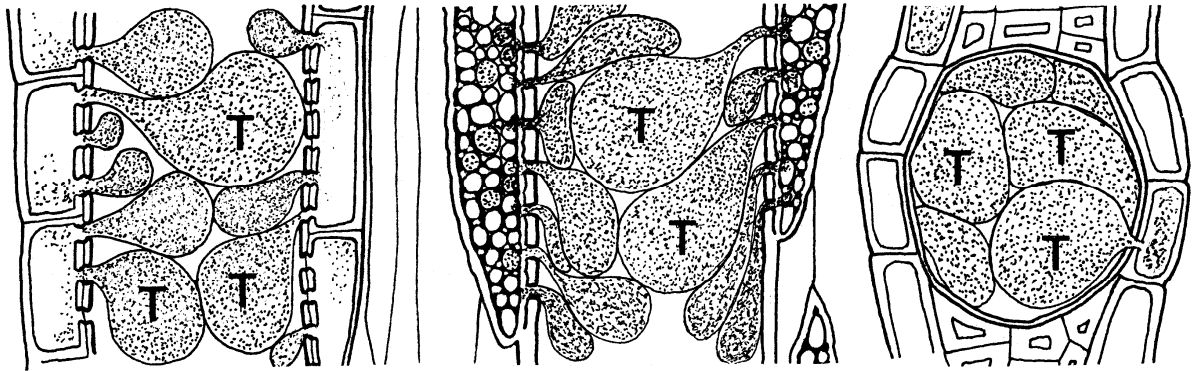


**Abbildung 9:** Gefässglied aus dem Frühholz (a) und dem Spätholz (b).

Im Gegensatz zu den einreihigen Holzstrahlen der Nadelhölzer, finden sich im Laubholz zum Teil recht breite Holzstrahlen, die im Tangentialschnitt durch ein Holzstück einen spindelförmigen Umriss annehmen. Sie bestehen ausschliesslich aus lebenden Parenchymzellen. Im Laubholz findet man aber auch axial ausgerichtetes Parenchym. Diese Zellen liegen entweder vereinzelt, in Bändern oder um Gefässe herum verteilt vor. Für Tropenhölzer ist ein „augenförmiges“ Umfliessen der Leitungsbahnen sehr typisch. Das Axialparenchym hat neben der Speicherfunktion auch die Aufgabe der Stoffausscheidung (z.B. Kristalle).

## Einlagerungen

Neben den Kristallen gibt es (vor allem im Laubholz) oftmals auch andere nachträgliche Einlagerungen in den Holzkörper. Die lebenden Zellen (Parenchymzellen) verursachen eine Verstopfung der Leitungsbahnen, indem sie gummiartige Substanzen in die Lumina der Zellen einlagern. Über Tüpfel gelangen diese Materialien auch in bereits tote Zellen, also Gefässe und/oder Fasern. Die Substanzen haben oftmals eine fungitoxische Wirkung. Auf diese Weise wird das Holz unempfindlicher gegen die Besiedlung und gegen einen Abbau durch Mikroorganismen. Eine Besonderheit stellen die Thyllen einiger Laubbäume dar: Parenchymzellen stülpen in die benachbarten Gefässe über die Tüpfelöffnungen suberinhaltige Taschen hinein (Abbildung 10), die in ihrer Form und Entstehung an Kaugummiblasen erinnern. Auf diese Weise können selbst grosse Zelllumina mit wenig Material- und Energieaufwand wirkungsvoll verschlossen werden. Die beschriebenen Einlagerungen entstehen als Abwehrmassnahme gegen Lufteinbruch oder Mikroorganismen, finden sich aber auch im Kernholz vieler Laubbäume wie z.B. Eiche, Ulme oder Robinie.

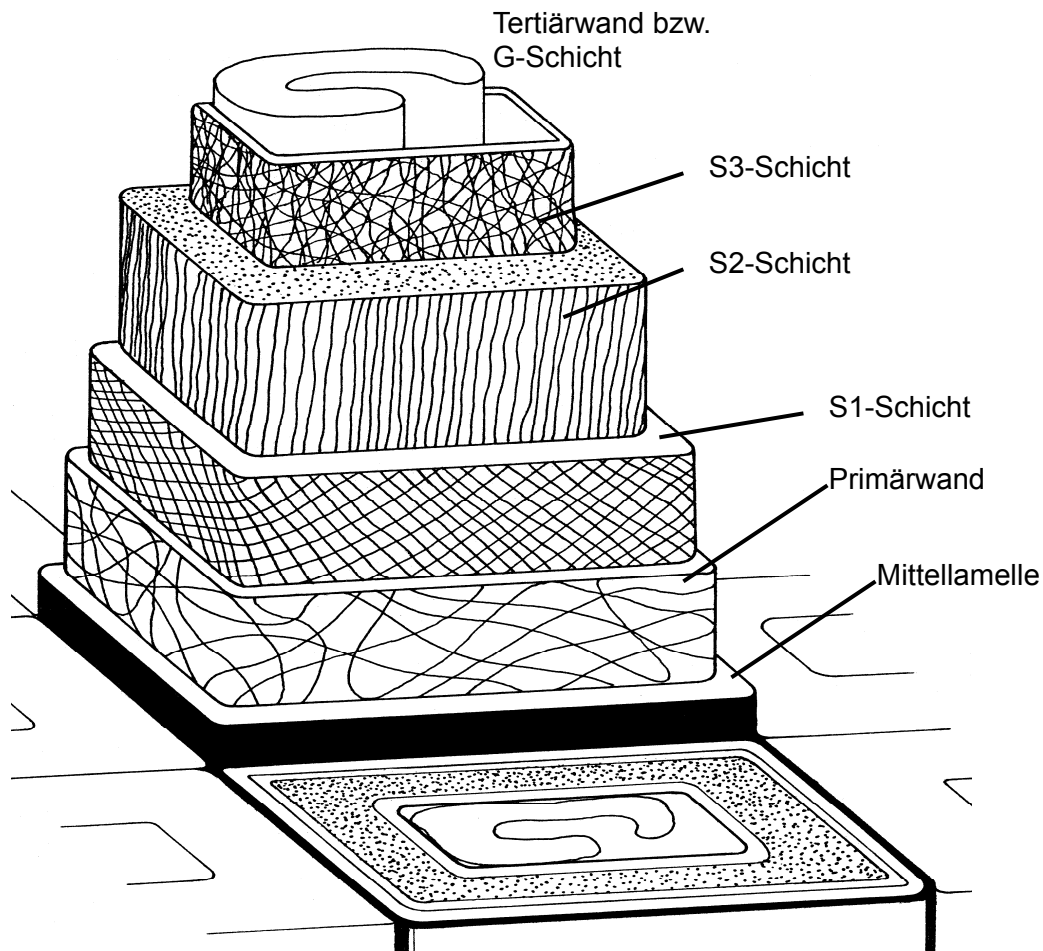


**Abbildung 10:** Schematische Darstellung verthyllter Laubholzgefässe mit Thyllen (T) aus Axialparenchym (links: Radialschnitt) und Holzstrahl-Parenchym (Mitte: Tangentialschnitt und rechts: Querschnitt).

## 1.3 Zellwandfeinbau

### Zellwandschichten

So unterschiedlich Funktion, Form und Aussehen der Holzzellen auch sind, der Aufbau der verholzten Zellwand folgt in allen Fällen einem sehr ähnlichen Grundmuster. Die Zellwand besteht aus den vier Wandschichten Mittellamelle, Primärwand, Sekundärwand und Tertiärwand, die sich konzentrisch um das Lumen anordnen (Abbildung 11). Die einzelnen Zellwandschichten unterscheiden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und in der Orientierung der Zellulose-Mikrofibrillen.



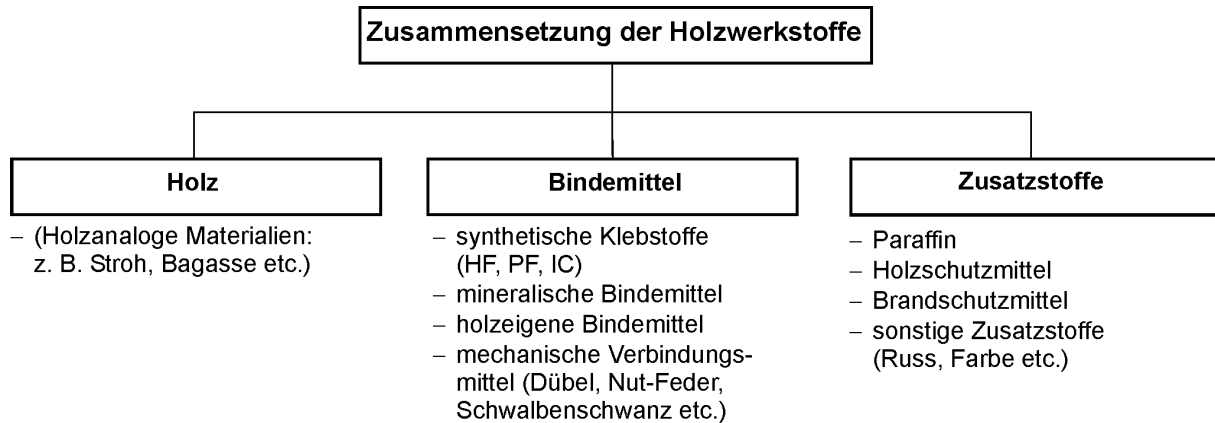
**Abbildung 11:** Aufbau der verholzten Zellwand. Schematische Zeichnung eines Querschnitts.

Die Mittellamelle verbindet zwei benachbarte Zellen, d.h. zwei aneinandergrenzende Zellen besitzen eine gemeinsame Mittellamelle. Sie besteht zu grossen Teilen aus Lignin (90%), Pektin und Hemizellulosen. Aus dem hohen Lignifizierungsgrad ergibt sich eine hohe Steifigkeit und Druckfestigkeit. Die Dicke der Mittellamelle beträgt gewöhnlich nur wenige Zehntel  $\mu\text{m}$  ( $1\text{mm} = 1000\ \mu\text{m}$ ).

## 2. Holzwerkstoffe

### 2.1 Übersicht zu den Holzwerkstoffen

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



**Abbildung 12:** Zusammensetzung von Holzwerkstoffen.

**Tabelle 3:** Holz- und Klebstoff-Anteile verschiedener Holzwerkstoffe.

Material	Holzanteil in %	Leimanteil in %
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 leichten 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 differenziert. Allgemein steigen die Anforderungen an die Holzqualität mit sinkendem Aufschlussgrad des Holzes. Sie sind bei Brettschichtholz und Lagenhölzern deutlich höher als bei Spanplatten.

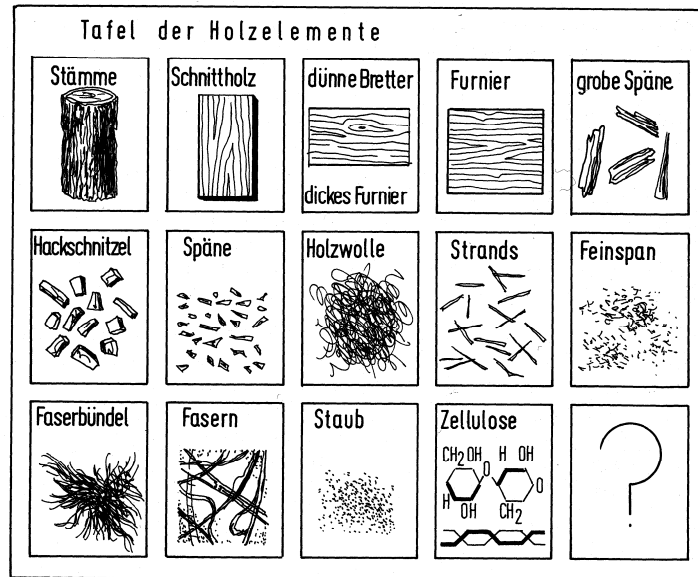
#### Vollholz

Vollholz kann in unvergütetes und vergütetes Vollholz eingeteilt werden. Zu Vollholz werden Schnittholz (einschliesslich getrocknetes), Furnier und Rundholz gezählt. Im Bauwesen wird für getrocknetes und meist vorsortiertes Holz häufig der Begriff *Konstruktionsvollholz* gebraucht. Zunehmende Bedeutung erlangt auch vergütetes Holz. Die Vergütung kann z.B. erfolgen durch:

- Druck (Erhöhung der Dichte und damit auch der Festigkeit, teilweise mit thermischer oder hydrothermischer Vorbehandlung kombiniert).
- Tränkung mit Kunstharzen zur Erhöhung der Härte und des Abriebwiderstandes oder mit Schutzmitteln gegen Feuer und Holzschädlinge.
- Thermische oder hydrothermische Vergütung, Vergütung in heissem Öl, Methylierung oder Acetylierung, thermische Vergütung und gleichzeitige Zugabe von Harzen aus Holz zwecks Verbesserung des Quell- und Schwindverhaltens und der Dauerhaftigkeit (und somit Reduzierung des Einsatzes von Holzschutzmitteln).

## Holzwerkstoffe

Das Holz kann durch Auftrennung in Strukturelemente von sehr unterschiedlicher Grösse zerlegt werden:



**Abbildung 13:** Strukturelemente von Holzwerkstoffen nach Marra (1972), zitiert in Dunky und Niemz (2002).

Mit der Grösse dieser Strukturelemente ändern sich auch wesentlich die Eigenschaften des daraus gefertigten Werkstoffes. So verringert sich mit zunehmendem Aufschluss des Holzes die Festigkeit.

**Tabelle 4:** Einfluss der Strukturauflösung auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffen (vom Schnittholz zur Faserplatte).

	Vollholz	Holzwerkstoff
<b>Festigkeit</b>		
<b>Aufschlussgrad</b>		
<b>Homogenität</b>		
<b>Isotropie</b>		
<b>Energieeinsatz</b>		
<b>Umweltbeeinträchtigung</b>		
<b>Wärmedämmung</b>		
<b>Oberflächengüte</b>		

Die Homogenität, die Wärmedämmung, die Isotropie und die Oberflächenqualität steigen dabei gleichzeitig ebenso wie der notwendige Energieaufwand und die Umweltbeeinträchtigung. Die Eigenschaften von Holzwerkstoffen lassen sich über die Struktur in einem weiten Bereich variieren. Holzwerkstoffe können in die folgenden Gruppen eingeteilt werden:



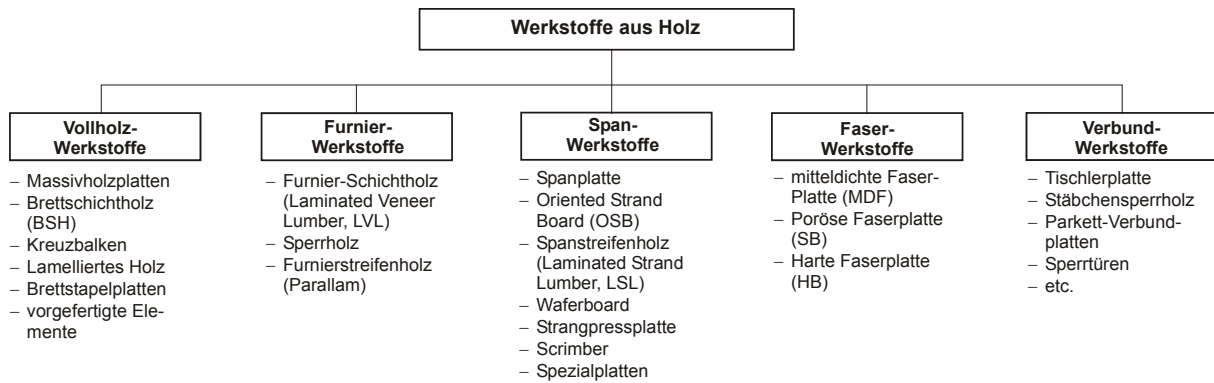


Abbildung 14: Einteilung von Holzwerkstoffen.

## 2.2 Werkstoffe auf Vollholzbasis

Werkstoffe 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 15 zeigt eine Einteilung der Werkstoffe auf Vollholzbasis. Zu dieser Gruppe gehören (s. auch Abbildung 16):

- **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, über 12 cm Dicke 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 Kastenträger.

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

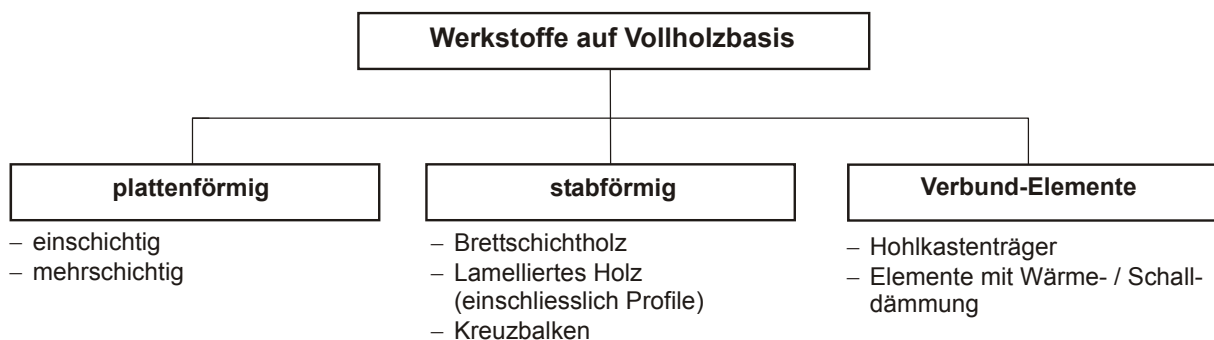
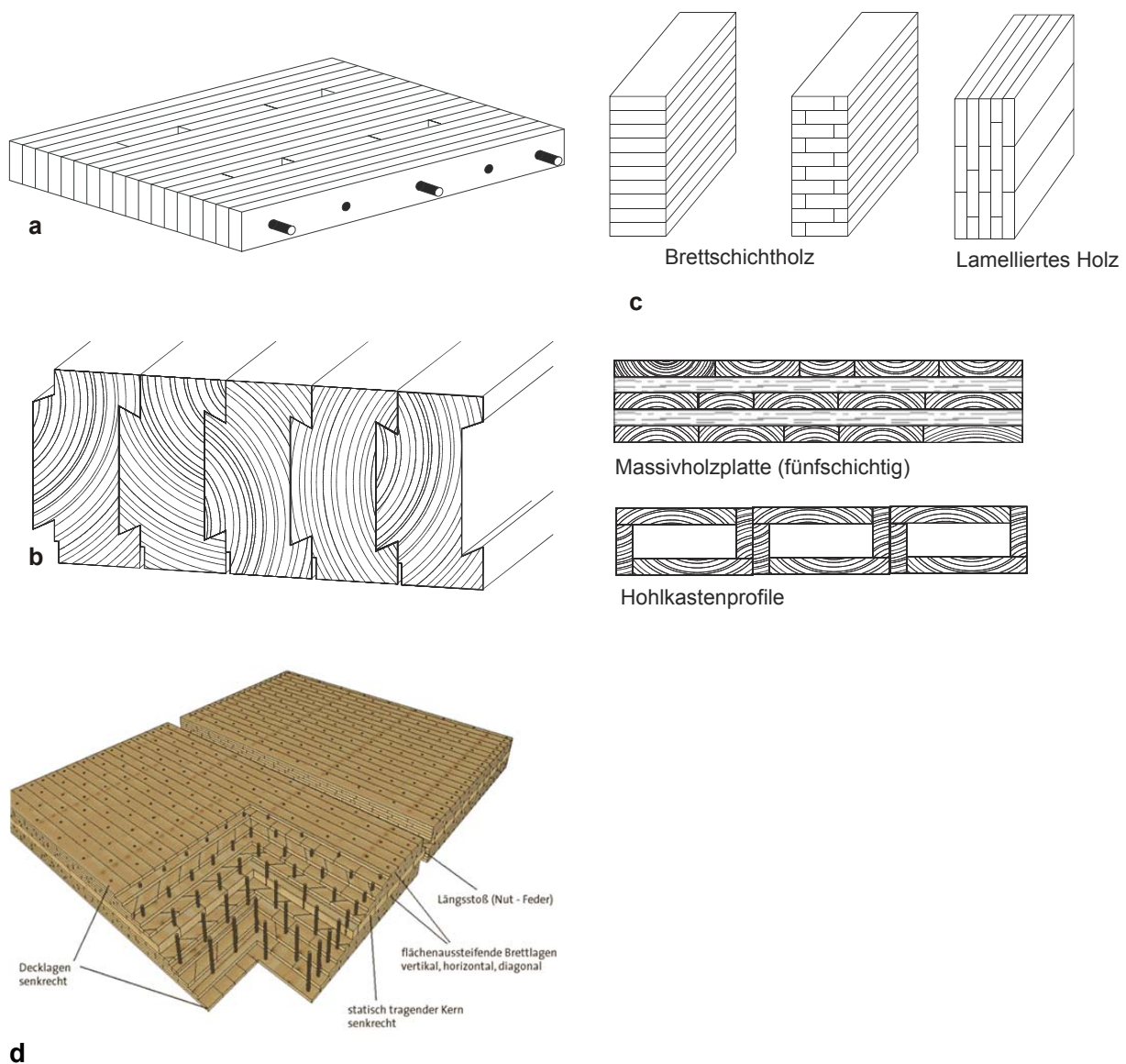


Abbildung 15: Einteilung von Werkstoffen auf Vollholzbasis.



**Abbildung 16:** Struktureller Aufbau ausgewählter Werkstoffe auf Vollholzbasis. **a** Brettstapelbauweise gedübelt, **b** Brettstapelbauweise, Schwalbenschwanzverbindung, **c** Massivholzplatten, Brettschichtholz, Hohlkastenprofile aus Holz, **d** Massive Konstruktion (Appenzeller Holz, analog Holz 100 der Fa. Thoma).

Wichtigste 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 Riffschnitt = stehende Jahninge, die Formbeständigkeit der Platten deutlich erhöht werden, da das Quell-/Schwindmass radial deutlich geringer ist als tangential).
- **Technologische Parameter** wie Pressdruck und Klebstoffanteil.

## 2.3 Werkstoffe auf Furnierbasis

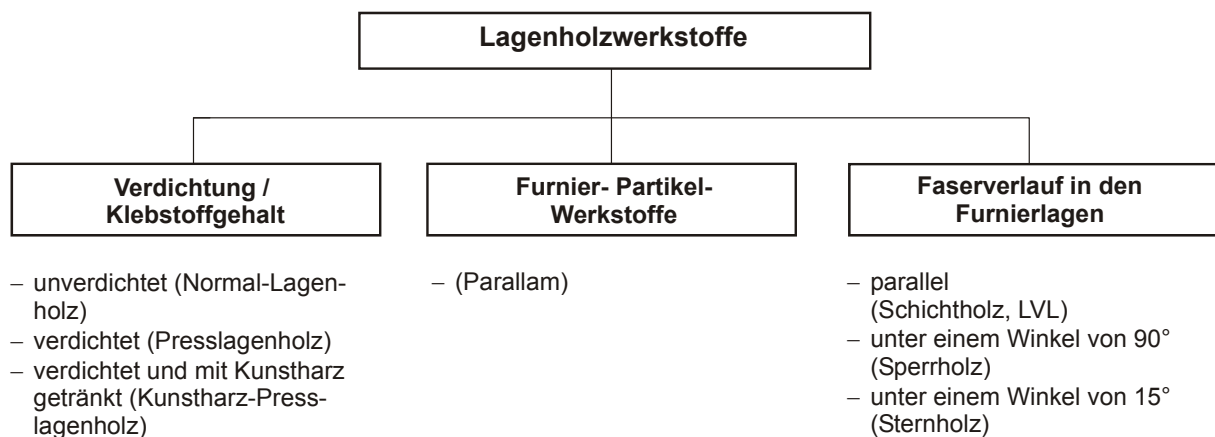
Werkstoffe auf Furnierbasis gehören zu den ältesten Holzwerkstoffen. In den letzten Jahren gewannen im Bauwesen der Einsatz von Furnierschichtholz (Laminated Veneer Lumber = LVL) und Furnierstreifenholz (Parallam) an Bedeutung.

Nach EN 313-1 wird Sperrholz unterteilt nach:

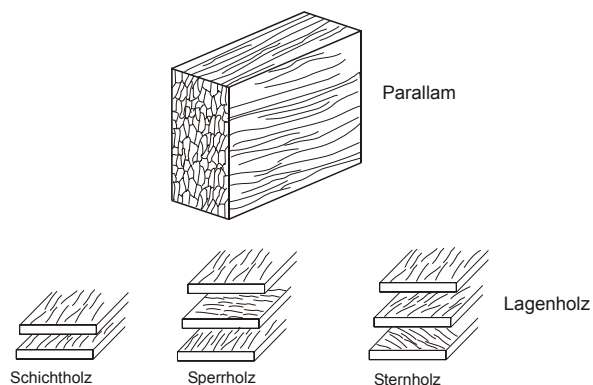
- dem Plattenaufbau (Furniersperrholz, Mittellagen-Sperrholz (Stab- und Stäbchensperrholz), Verbundsperrholz).
- der Form (eben, geformt).
- den Haupteigenschaften (Verwendung im Trockenbereich / im Feuchtbereich / im Aussenbereich).
- den mechanischen Eigenschaften.
- dem Aussehen der Oberfläche.
- dem Oberflächenzustand (z. B. nicht geschliffen, geschliffen).
- den Anforderungen des Verbrauchers.

Abbildung 17 zeigt eine Einteilung der Werkstoffe auf Furnierbasis. Die Eigenschaften können durch Furnierdicke (Aufbaufaktor), Dichte und Leimgehalt wesentlich beeinflusst werden. Sperrholz wird für Spezialzwecke auch in grossen Dicken gefertigt.

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.



**Abbildung 17:** Einteilung von Werkstoffen auf Furnierbasis (Niemz 1993).



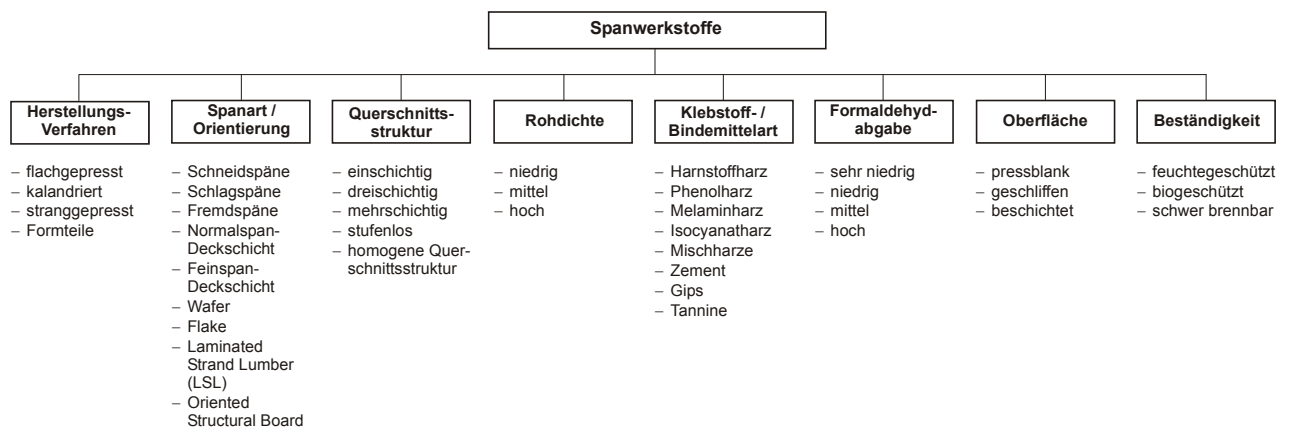
**Abbildung 18:** Strukturmodelle von Furnierwerkstoffen.

## 2.4 Werkstoffe auf Spanbasis

Werkstoffe auf Spanbasis sind heute der weltweit dominierende Holzwerkstoff. Abbildung 19 zeigt eine Übersicht. Die Klassifizierung erfolgt nach EN 309.

Klassifizierungsmerkmale sind:

- 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).



**Abbildung 19:** Einteilung von Werkstoffen auf Spanbasis (Niemz 1993).

Neben konventionellen Spanplatten (EN 312) und OSB (EN 300) werden heute eine Vielzahl von Spezialplatten kundenspezifisch in kleinen Mengen gefertigt.

Auf diesem Gebiet hat es ebenso grosse Fortschritte gegeben, wie im Bereich der Engineered Wood Products.

Als Beispiele seien genannt:

- Platten mit reduziertem elektrischen Widerstand (Zugabe von Russ) zur Verminderung dielektrischer Aufladungen (z. B. für Fussböden in Computerarbeitsräumen).
- Platten mit homogener Mittelschicht für Profilierungen.
- Platten mit besonders heller Deckschicht (entrindetes Holz) für Möbelfronten.
- Extrem leichte, nach dem Flachpressverfahren hergestellte Spanplatten mit Rohdichten von 300 - 400 kg/m<sup>3</sup>.
- Höher verdichtete Platten aus Laubholz für Bodenplatten.
- Extrem dicke, nach dem Flachpressverfahren gefertigte Platten für den Hausbau (z.B. Homogen 80, 80 mm dick).

Vielfach werden Komplettsysteme für das Bauwesen von den Herstellern angeboten.

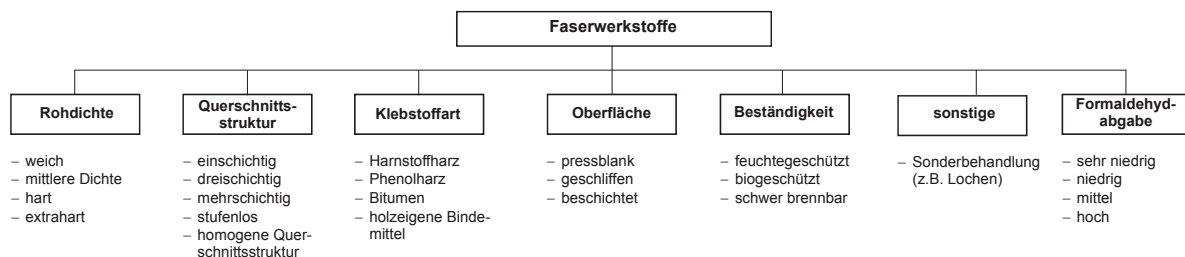
Klassische Spanplatten werden heute in einer sehr grossen Variabilität in einem breiten Rohdichteprofil gefertigt. Dünne, nach dem Kalanderverfahren hergestellte Spanplatten und stranggepresste Spanplatten haben für Spezialzwecke einen festen Markt. Dünne Spanplatten und MDF werden aber auch zunehmend in kontinuierlichen Pressen im mm-Bereich (bei MDF bis 1,5mm) hergestellt.

Zahlreiche Hersteller haben eine bauaufsichtliche Zulassung und für den Hersteller spezifische Kennwerte zur statischen Berechnung.

## 2.5 Werkstoffe auf Faserbasis

Nach EN 216 werden Faserplatten wie folgt unterteilt (Abbildung 20):

- Poröse Faserplatten (SB)
- Poröse Faserplatten mit zusätzlichen Eigenschaften (SB.I)
- Mittelharte Faserplatten geringer Dichte (MB.L)
- Mittelharte Faserplatten hoher Dichte (MB.H)
- Mittelharte Faserplatten hoher Dichte mit zusätzlichen Eigenschaften (MB.I)
- Harte Faserplatten (HB)
- Harte Faserplatten mit zusätzlichen Eigenschaften (HB.I)
- Mitteldichte Faserplatten (MDF)
- Mitteldichte Faserplatten mit zusätzlichen Eigenschaften (MDF.I)



**Abbildung 20:** Einteilung von Werkstoffen auf Faserstoffbasis (Niemz 1993).

Auch auf diesem Gebiet wurden wesentliche Fortschritte im Bereich von Spezialprodukten erreicht. Zu nennen sind hier insbesondere MDF (Medium Density Fiberboard). Es gelang, die Rohdichte für spezielle Einsatzbereiche (Dachplatten, Wandplatten) auf bis zu  $350 \text{ kg/m}^3$  zu reduzieren. Der Vorteil liegt, neben der geringen Dichte, in einem niedrigen Diffusionswiderstand.

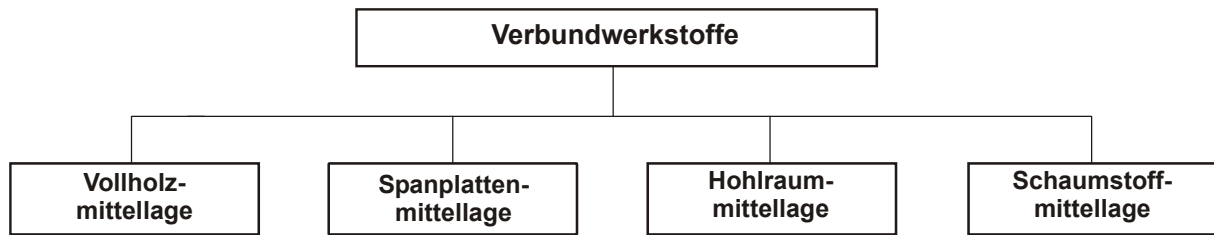
Dämmplatten auf der Basis der MDF-Technologie mit einer Dichte bis zu  $150 \text{ kg/m}^3$  werden industriell gefertigt. Dabei wird Isocyanat als Bindemittel eingesetzt. Auf Basis der MDF-Technologie gefertigte Dämmplatten haben im Vergleich zu den nach dem Nassverfahren gefertigten Platten eine höhere Druckfestigkeit und eine verbesserte Oberflächenqualität. Ebenso werden Dämmplatten auf Faserbasis unter Zugabe thermoplastischer Fasern nach einer in der Textiltechnik üblichen Technologie gefertigt.

## 2.6 Verbundwerkstoffe

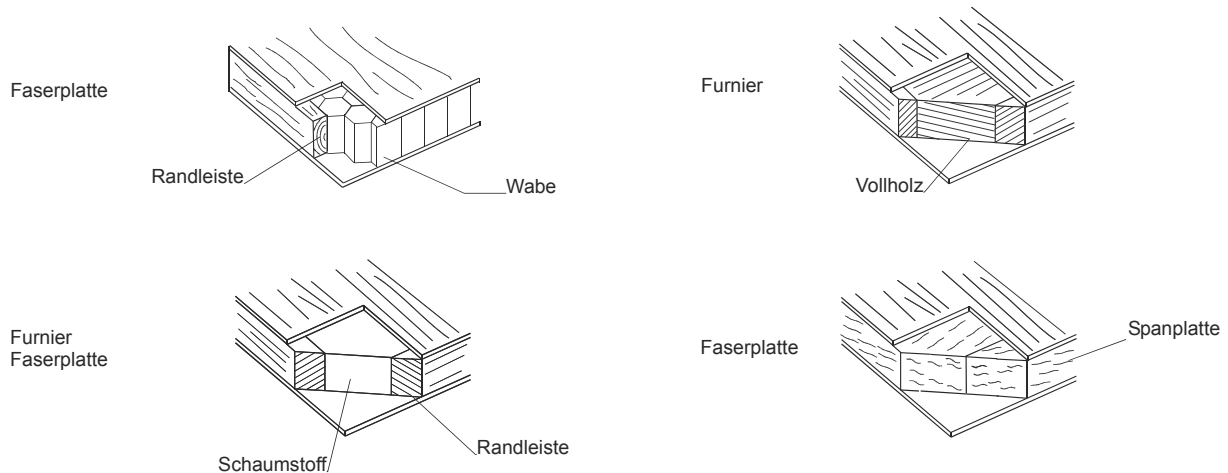
Eine zunehmende Bedeutung gewinnen auch Spezialprodukte wie:

- 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.

Dabei handelt es sich um ein mehrschichtiges Material, mit meist hochfesten Decklagen und einer Mittellage aus einem leichteren Kern. Abbildung 21 zeigt eine Einteilung von Verbundwerkstoffen und in Abbildung 22 sind verschiedene Strukturmodelle dargestellt.



**Abbildung 21:** Einteilung von Verbundwerkstoffen.



**Abbildung 22:** Strukturmodelle von Verbundwerkstoffen (verschiedene Kombinationen von Deck- und Mittellagen).

## 2.7 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. Als Vorteile im Vergleich zu Vollholz werden genannt:

- Sehr grosse und variable Abmessungen (insbesondere Längen), da endlos gefertigt.
- Keine Verformungen durch Trocknungsspannungen.
- Eine z.T. höhere Festigkeit als Vollholz, da keine Defekte (wie Äste) die Festigkeit vermindern.

Die unter der Bezeichnung Engineered Wood Products gefertigten Produkte werden überwiegend mit Phenolharz oder Isocyanat feuchtebeständig verklebt.

Tabelle 5 zeigt ausgewählte strukturelle Parameter von Engineered Wood Products.

Strukturell handelt es sich dabei um Weiterentwicklungen von bekannten Werkstoffen auf der Basis von Spänen (LSL) oder Furnier (LVL, PSL). Für diese Werkstoffe gelten weitgehend die wissenschaftlichen Grundlagen von Spanplatten und Lagenholz. Die mechanischen Eigenschaften von Engineered Wood Products liegen im Bereich von Vollholz oder darüber. Bei diesen Produkten ist ein deutlicher Einfluss der Belastungsrichtung vorhanden (z.B. Biegung in und senkrecht zur Plattenebene).

**Tabelle 5:** Typische Strukturmerkmale von Engineered Wood Products.

Produkt	Strukturelemente	Überwiegende Anwendung
<b>OSB</b> = Spanwerkstoff	<b>lange Späne</b> $l = 75...100$ mm $b = 5...30$ mm $d = 0,3...0,65$ mm	Platten differenzierter Dicke und Qualität
<b>LSL</b> = Spanwerkstoff	<b>extra lange Späne</b> $l = 300$ mm $b = 25$ mm $d = 0,8-1$ mm	Platten (bis 140 mm Dicke), Profile, Balken
<b>Structure Frame</b> = Spanwerkstoff	<b>Wafer</b> $l = 20...30$ mm $b = 20...30$ mm $d = 1$ mm	Platten
<b>Scrimber</b> = Spanwerkstoff	<b>durch Quetschen gefertigte Partikel</b>	Balken
<b>LVL</b> = Lagenholz	<b>Furnierlagen</b> $d = 2,5...4$ mm	Platten, Balken
<b>PSL</b> = Lagenholz	<b>Furnierstreifen</b> $b = 13$ mm $l = 0,6-2,5$ m	Balken
<b>COM-PLY</b> = Verbundwerkstoff	<b>Spanplatte, beplankt mit Schichtholzlagen</b>	Balken

#### Furnierschichtholz (Laminated Veneer Lumber, LVL)

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 S (alle Lagen faserparallel) und Q (einige Lagen senkrecht angeordnet, um die Festigkeit senkrecht zur Faserrichtung zu erhöhen) hergestellt wird.

Teilweise erfolgt bei LVL eine Vorsortierung der Furnierlagen nach der Festigkeit.

Das Material wird sowohl als Plattenmaterial als auch für Balken (Brücken, Treppenbau) verwendet. Auch Hohlprofile auf LVL-Basis sind bekannt (Kawai, Sasaki und Yamauchi 2001). Dadurch wird eine wesentliche Verminderung des Materialeinsatzes erreicht.

#### Furnierstreifenholz (Parallel Strand Lumber; PSL; Parallam)

Dabei 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 verklebt.

Das Material wird für Balken, vielfach auch für Verstärkungen, z. B. zur Aufnahme von Druckkräften, eingesetzt.

#### Spanstreifenholz (Laminated Strand Lumber; LSL)

Darunter wird ein Spezialprodukt von OSB (**Oriented Strand Board**) mit extrem langen (ca. 300 mm) Spänen verstanden. Als Rohstoff wird meist Aspe verwendet. Der Einsatz erfolgt überwiegend im Holzbau für statisch belastete Elemente (Ersatz für zu konstruktiven Zwecken eingesetztes Schnittholz).

### Scrimber

Dabei handelt es sich um einen Werkstoff, bei dem durch ein nichtzerspanendes Zerlegen von Holz (Zerquetschen von Rundholz) erzeugte Partikeln unter Anwendung von Druck und Wärme verleimt werden. Die Partikeln sind relativ lang und schwer manipulierbar.

### Verbundsysteme

Hierunter werden z. B. die im Bauwesen eingesetzten Träger mit Stegen aus Spanplatten und Zug- oder Druckgurten aus Furnierschichtholz oder auch Vollholz (zum Teil auch aus OSB) verstanden. Auch Verbundplatten mit Kernen aus Holz und Holzwerkstoffen sowie hochfeste Decklagen können in diese Gruppe eingeordnet werden.

## 2.8 Wood Plastic Composites (WPC)

WPC sind eine Mischung von Kunststoffen und Holzpartikeln (Späne, Fasern). Der Holzanteil liegt zwischen 5-95%. Die Verarbeitung erfolgt mit Anlagen der Kunststoffverarbeitung. Das Material wird für Fassadenverkleidungen, Terrassenböden, Fenster u.a. verwendet.



# KAPITEL III: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe

## 1. Koordinatensystem

Bei der Betrachtung des Holzes unterscheiden wir drei Schnittebenen. Die Beurteilung und Bestimmung von Holzeigenschaften ist stark von der Belastungsrichtung bzw. Bezugsebene abhängig. Das bedeutet, dass es sich bei Holz um ein inhomogenes und anisotropes Material handelt.

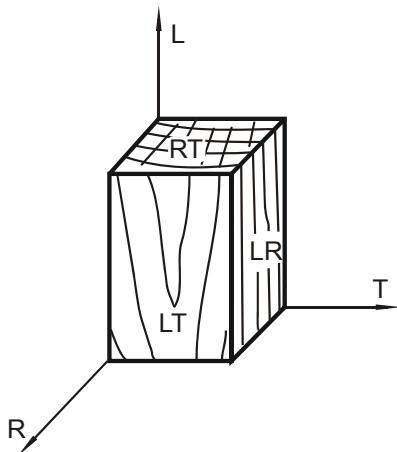


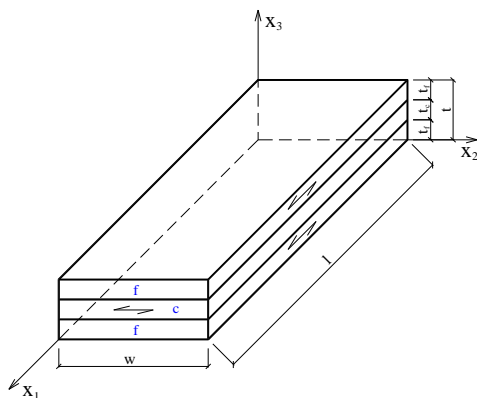
Abbildung 1a: Vollholz

Belastungsrichtungen:

- L- Longitudinal
- R- Radial
- T- Tangential

Schnittebenen:

- LT- Tangentialfläche, Fladerschnitt
- RT- Querschnitt, Hirnfläche
- LR- Radialfläche, Riffschnitt



1b) Holzwerkstoffe (häufig gilt für die Indizes auch: 1 - x = in Herstellungsrichtung oder in Faserrichtung der Decklagen; 2 - y = senkrecht zur Herstellungsrichtung oder zur Faserrichtung der Decklagen; 3 - z = senkrecht zur Plattenebene)

**Abbildung 23:** Koordinatensysteme von Holz und Holzwerkstoffen.

## 2. Dichte

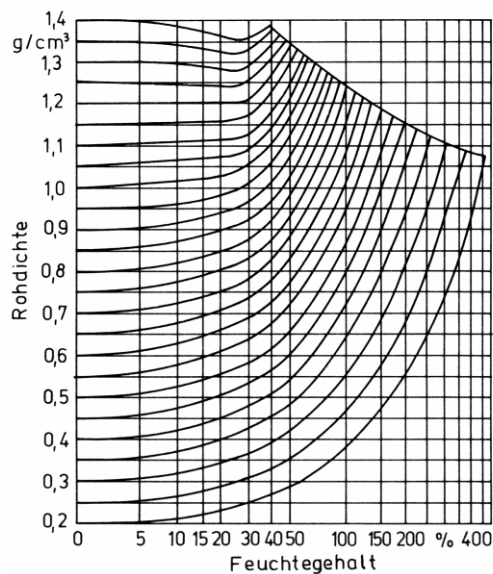
Die Rohdichte beeinflusst nahezu alle Eigenschaften massgeblich (z.B. Festigkeit, Schwind- und Quellmaße, Wärmeleitfähigkeit). So steigen mit zunehmender Dichte Festigkeit und Quellung sowie die Wärmeleitzahl. Die Dichte variiert zwischen den einzelnen Holzarten in einem weiten Bereich von 100 kg/m<sup>3</sup> (Balsa) bis 1200 kg/m<sup>3</sup> (Pockholz). Infolge des hygroskopischen Verhaltens des Holzes ist die Dichte feuchteabhängig (s. Graphik). Es sollte daher immer bei der Angabe der Dichte auch die Holzfeuchte mit angegeben werden. Die Rohdichte berechnet sich zu (vgl. DIN 52182):

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad \text{in kg/m}^3$$

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

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

- Darrdichte (Rohdichte im darrgetrockneten Zustand: Masse darrgetrocknet/Volumen darrgetrocknet).
- 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 darrgetrocknet/Volumen im maximal gequollenen Zustand (= oberhalb Fasersättigung)).
- Reindichte (Masse des darrgetrockneten Holzes/Volumen der reinen Zellwand, ohne Hohlräume). Die Reindichte beträgt für alle Holzarten einheitlich ca. 1500 kg/m<sup>3</sup>.



**Abbildung 24:** Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Rohdichte.

Die Rohdichte von Brett-schichtholz und Sperrholz liegt im Bereich der Dichte des eingesetzten Holzes. Bei Partikelwerkstoffen kann die Rohdichte von 150 kg/m<sup>3</sup> bis 1050 kg/m<sup>3</sup> variieren. Spanplatten und MDF haben ein typisches Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene, das durch Partikelstruktur, Feuchte und Presstechnik stark variiert werden kann. Mit der Rohdichte steigen die Festigkeit, der E-Modul und die Schallgeschwindigkeit. Durch Erhöhung der Deckschichtroh-dichte bei Holzwerkstoffen können die Biegefestigkeit und der Biege-E-Modul erhöht werden, gleichzeitig wirkt sich eine geschlossene Deckschicht positiv auf die Beschichtbarkeit aus. Für die Schmalflächenbearbeitung wird meist ein relativ homogenes Rohdichteprofil mit einer geschlossenen, nicht zu porigen Mittelschicht angestrebt. Die Rohdichte ist eine der dominierenden Einflussgrößen.

### 3. Holzfeuchte, Quellen und Schwinden

#### Definition

Kenngroße zur Beurteilung des Wasseranteils ist der Feuchtegehalt (DIN 52183). Dieser berechnet sich zu:

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100 \quad (\%)$$

$\omega$	Feuchtegehalt (früher mit $u$ bezeichnet (DIN 52183))
$m_{\omega}$	Masse des Holzes im feuchten Zustand
$m_{dtr}$	Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand

#### Grenzzustände des Systems Holz-Wasser

Holz ist ein kapillarporöses System. Sowohl in die Makro- als auch die Mikroporen (Poren im Zellwandsystem) des Holzes können sich Wassermoleküle einlagern.

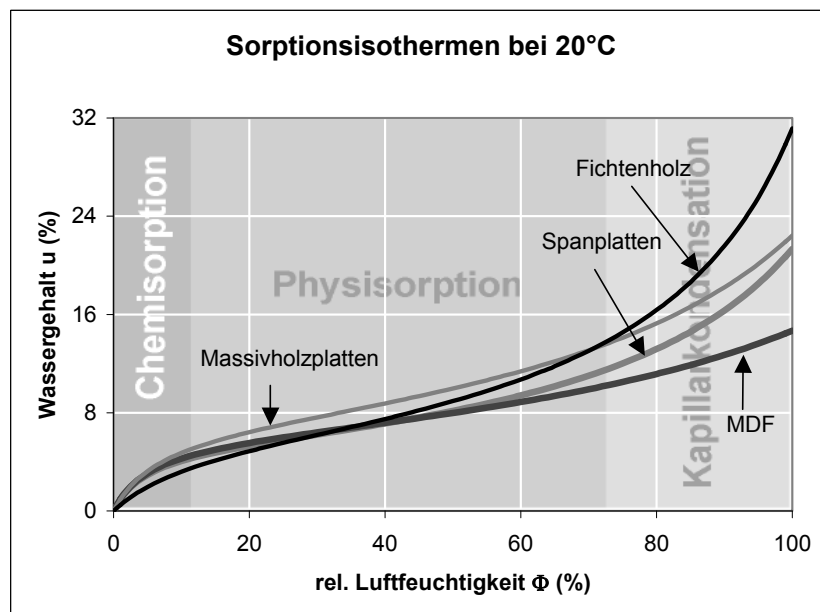
Wir unterscheiden 3 Grenzzustände des Systems Holz – Wasser:

- Darrtrocken: Es ist kein Wasser im Holz vorhanden, Holzfeuchte 0%.
- Fasersättigung: Das gesamte Mikrosystem der Zellwand (intermicellare und interfibrillare Hohlräume) ist maximal mit Wasser gefüllt. Die Holzfeuchte liegt etwa bei 28%; ein gewisser Einfluss der Holzart ist vorhanden.
- Wassersättigung: Das Mikro- und Makrosystem des Holzes ist maximal mit Wasser gefüllt. Die Holzfeuchte liegt je nach Dichte des Holzes zwischen 770% (Balsa) und 31% (Pockholz).

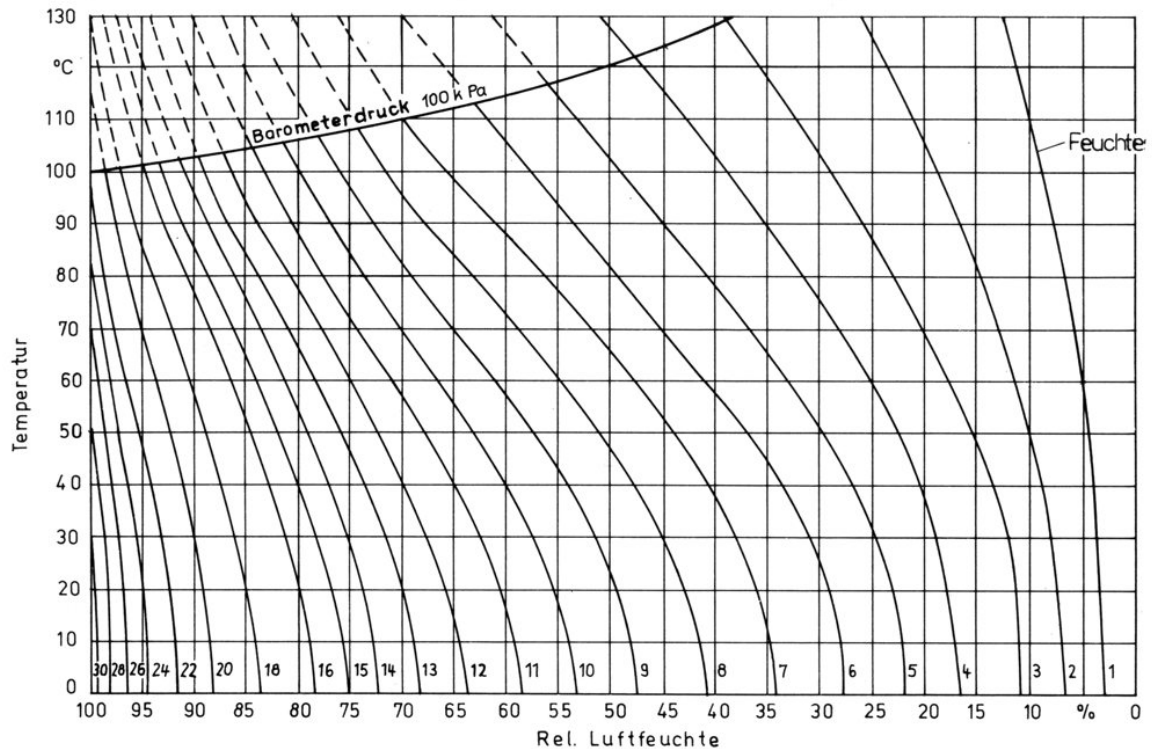
Der über Sorption bis zur Fasersättigung aufgenommene Wasseranteil im Holz wird als gebundenes Wasser bezeichnet. Das oberhalb des Fasersättigungsbereiches eingelagerte Wasser wird als freies Wasser bezeichnet.

#### Sorptionsverhalten

Holz ist hygroskopisch und nimmt Wasser aus der Luft durch Sorption auf bzw. gibt dieses durch Desorption an die Luft ab. Dies gilt bis zu einer relativen Luftfeuchte von 100%. Bei dieser Luftfeuchte ist der sogenannte Fasersättigungsbereich erreicht. Einer bestimmten Temperatur und rel. Luftfeuchte ist also eine holzartenspezifische Holzfeuchte zugeordnet. Wird die rel. Luftfeuchte reduziert, kommt es zur Desorption. Zwischen Adsorption und Desorption ist ein Hysterese-Effekt vorhanden, d.h. bei Desorption ist die Holzfeuchte um 1-2% höher als bei der Adsorption.



a)



b)

**Abbildung 25:** Sorptionsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen: a) Sorptionsisothermen verschiedener Holzwerkstoffe; b) Sorptionsisotherme von Fichtenholz bei variabler rel. Luftfeuchte und Temperatur.

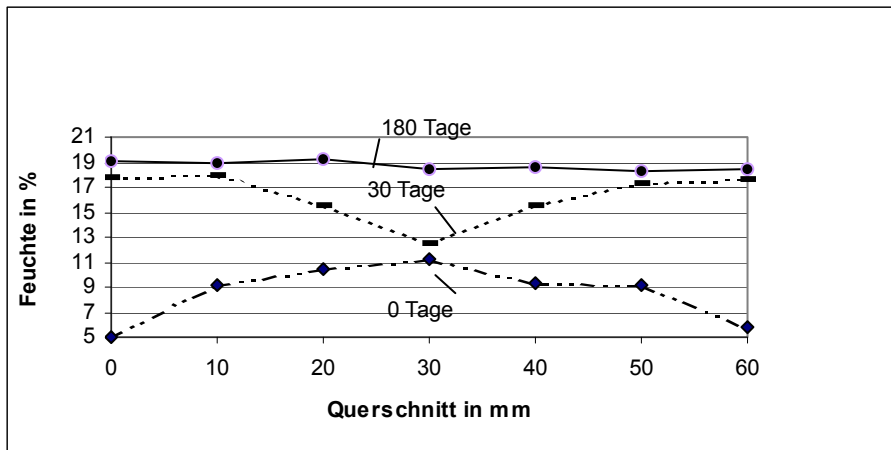
Die Feuchteaufnahme und -bindung zwischen darr trockenem und fasergesättigtem Holz wird getrennt in:

- Chemisorption (Bildung einer monomolekularen Wasserschicht)
- Physisorption oder physikalische Adsorption (Bildung einer polymolekularen Wasserschicht)
- Kapillarkondensation (Kondensation des Wassers in den Kapillaren)

Oberhalb des Fasersättigungsbereiches nimmt Holz flüssiges Wasser durch Kapillarkräfte auf. Der Feuchtetransport im Holz erfolgt nach den Gesetzen der Kapillarphysik (von weiten in Richtung enger Kapillaren). Unterhalb der Fasersättigung erfolgt der Feuchtetransport durch Diffusion.

Durch Tüpfelverschluss (z.B. bei Fichte) oder Verthyllung der Laubhölzer (z.B. bei Robinie, Eiche, Edelkastanie) wird die kapillare Feuchteaufnahme stark reduziert, was sich auch beim Tränken mit Holzschutzmitteln in einer geringen Tränkmittelaufnahme äussert. Ebenso ist ein Einfluss auf das Trocknungsverhalten vorhanden.

Da Trocknungs- und Befeuchtungsprozesse sehr langsam ablaufen (Feuchtetransport unterhalb der Fasersättigung erfolgt durch Diffusion), stellt sich bei grösseren Querschnitten stets ein Feuchteprofil ein. Während an der Oberfläche sehr schnell die Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist, kann dies in Brettschichtholzbalken ein über Monate oder gar Jahre dauernder Prozess sein. Da auch im Rauminneren oder im Freien die rel. Luftfeuchte ständig wechselt, kommt es praktisch nur im oberflächennahen Bereich zu einem Angleichen an die aktuelle rel. Luftfeuchte. Abbildung 26 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 Feuchtklima bei 2°C/90% rel. Luftfeuchte gelagert. Durch ein solches Feuchteprofil entstehen Eigenspannungen, bei asymmetrischer Feuchteeinwirkung auch Verformungen.



**Abbildung 26:** Feuchteverteilung senkrecht zur Plattenebene in einer dreischichtigen Massivholzplatte (1m x 1m x 0,06m) nach Wechsel vom Normklima bei 20°C/65% rel. Luftfeuchte auf 2°C/90% rel. Luftfeuchte.

### Schwinden und Quellen (Abbildung 27)

Bei der Feuchteänderung innerhalb des hygroskopischen Bereiches unterhalb der Fasersättigung (liegt zwischen 28-32% Holzfeuchte) kommt es zu Dimensionsänderungen.

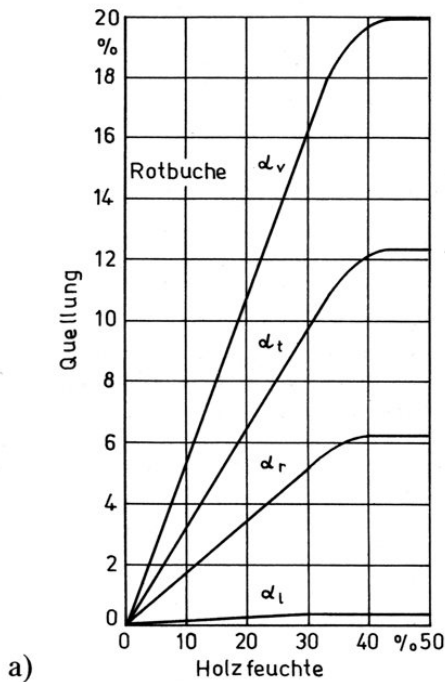
Bei Feuchteaufnahme kommt es zum Quellen, bei Feuchteabgabe zum Schwinden. Das Quell- und Schwindverhalten in den drei Hauptschnittrichtungen unterscheidet sich wesentlich. In Faserrichtung ist das Quellen und Schwinden gering. Holz quillt in Radialrichtung 10 – 20 mal und tangential 15 – 30 mal stärker als in Faserrichtung.

Mit zunehmender Rohdichte nimmt das Ausmaß der Quellung linear zu. Zudem bestehen große Unterschiede im Quellverhalten zwischen den Holzarten.

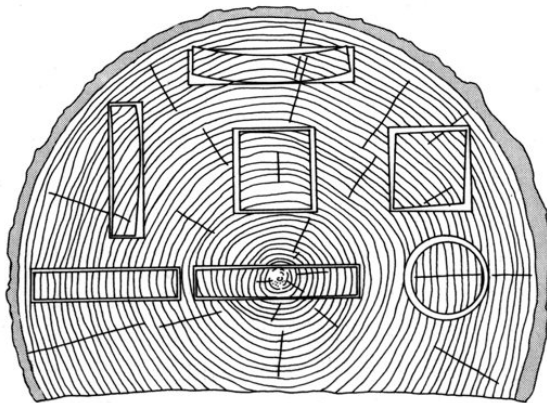
Häufig wird anstelle der maximalen Quell- bzw. Schwindmasse (Dimensionsänderung vom maximal gequollenen Zustand bezogen auf den Darrzustand) die differentielle Quellung in % Quellung pro % Feuchteänderung angegeben (%/%).

**Tabelle 6:** Quellung und Schwindung von Holz nach DIN 52184.

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



a)



b)

**Abbildung 27:** Quellung von Holz (a) und Auswirkungen auf die Verformung (b).

Wird Holz beim Quellen bzw. Schwinden behindert (z.B. bei senkrecht zueinander verklebten Schichten in Massivholzplatten), entstehen innere Spannungen, die zu plastischen Verformungen und bei Überschreiten der Festigkeit schließlich zu Rissen führen können. Neben den inneren Spannungen im Material entstehen bei fester Einspannung der Proben auch erhebliche Quelldrücke ( $5-10\text{N/mm}^2$ ). So wurde das Quellen des Holzes bereits in der Antike zum Sprengen von Steinen verwendet.

Die Quellungsanisotropie des Holzes führt dazu, dass sich das trocknende Holz bei schräg verlaufenden Jahrringen stark verzieht. Auch lokale Inhomogenitäten (Dichteschwankungen, abweichende Jahrringlagen) führen bei langzeitiger Wechselklimalagerung zu unruhigen Oberflächen. Durch Oberflächenbeschichtung kann die Feuchteaufnahme des Holzes deutlich verzögert werden.

Bei Holzwerkstoffen ist die Längenquellung leicht höher als bei Vollholz in Faserrichtung, da eine gewisse Quellung der Partikel senkrecht zur Faserrichtung in die Quellung in Plattenebene eingeht. Die Dickenquellung ist bei Spanplatten, Faserplatten und OSB deutlich höher als die von Vollholz, da die verdichteten Partikeln (Dichte der Holzwerkstoffe ist höher als die von Vollholz) zurückquellen.

Die Längenquellung von MDF ist etwas geringer als die von Spanplatten. Bei OSB in Orientierungsrichtung der Späne ist sie niedriger als senkrecht dazu. Die Quellung wird durch die Verleimungsgüte und den Anteil an Hydrophobierungsmittel bestimmt. Dies ist auf das Rückquellen der beim Pressen verdichteten Partikeln zurückzuführen („spring back“-Effekt). Dieser Effekt tritt auch bei der Befeuchtung von verdichtetem Vollholz (Pressvollholz) auf. Auch dieses Holz quillt bei Wasserlagerung stärker als unverdichtetes Holz, wenn es nicht spezifisch modifiziert wurde. Die Holzfeuchte sollte vor dem Einsatz des Holzes der Ausgleichsfeuchte im späteren Einsatz weitgehend

angepasst werden, um Quellen und Schwinden sowie Formänderungen und Rissbildung zu minimieren.

**Tabelle 7:** Prozentuale Quellung in % / % Feuchteänderung für ausgewählte Holzwerkstoffe.

Material	Quell- /Schwindmass in %/%	
	in Plattenebene/ Länge	Senkrecht zur Plattenebene/ Faserrichtung
Sperrholz	0,02	0,30
Spanplatte Phenolharz	0,025	0,45
	Andere Harze	0,70 (0,85)
Brettschichtholz <sup>1)</sup>	0,01	0,24
MDF	(0,15..0,20)	(0,80)

( ) unveröffentlichte Messungen Niemz

**Tabelle 8:** Holzfeuchte im praktischen Gebrauch.

Einsatzfall	Holzfeuchte in %
Schnittholz für Wohnraummöbel	8-10
Schnittholz im Innenbereich	8
Schnittholz für Bauzwecke, unbeheizt	12-18
Inneneinbauten	8-12
Heizkörperverkleidungen	6-8

### 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. Einfluss auf das Kriechen oder auch auf die Festigkeit von unter Dauerlast beanspruchten Holzkonstruktionen. So kann es durch Überlagerung 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 Quellungspannungen subtrahieren.

### Elastomechanische Eigenschaften

Bedingt durch den orthotropen Aufbau des Holzes (unterschiedliche Eigenschaften in den Hauptschnittrichtungen: längs, radial, tangential) sind, je nach Auflösungsgrad der Struktur des nativen Holzes und der Struktur des daraus gefertigten Holzwerkstoffes, auch die Eigenschaften von Holzwerkstoffen mehr oder weniger orthotrop. Bei Furnierschichtholz, Massivholzplatten und auch bei OSB ist ein deutlicher Einfluss in der Orientierung der Decklagen zur Belastungsrichtung vorhanden. Senkrecht zur Faserrichtung (Probenlängsachse) belastete Lagen (z.B. Mittellagen bei Massivholzplatten, querliegende Lagen bei LVL) haben deutlich niedrigere Festigkeitseigenschaften als in Faserrichtung belastete Lagen. Werkstoffe auf Vollholzbasis (Brettschichtholz, Massivholzplatten) sind aus diesem Grunde empfindlich gegen Schub und gegen Zug senkrecht zur Faser.

Bei konventionellen Span- und Faserplatten sind herstellungsbedingt in Fertigungsrichtung etwa um 10 % höhere mechanische Eigenschaften und eine niedrigere Quellung vorhanden als senkrecht dazu. Dies ist auf eine gewisse Partikelorientierung beim Streuvorgang zurückzuführen. Infolge des viskoelastischen Charakters von Holzwerkstoffen sind alle Eigenschaften zusätzlich zeitabhängig. Dies gilt sowohl für die Kenngrößen des elastischen Verhaltens (E-Modul, Schubmodul) als auch für die Festigkeit (z.B. Biege-, Zug-, Druckfestigkeit).

## 4. Thermische Eigenschaften

Zu den thermischen Eigenschaften zählen:

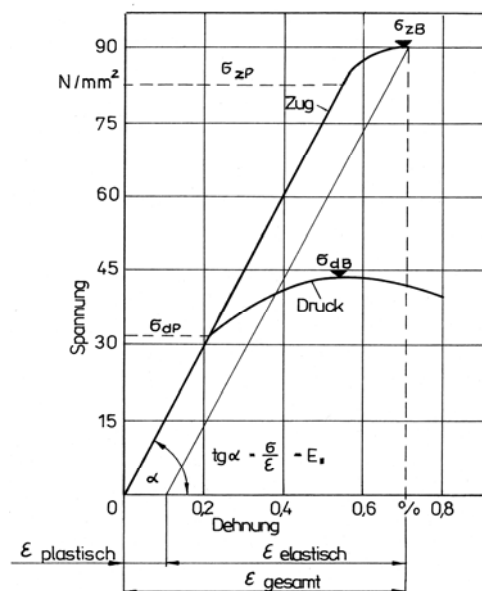
- Wärmeleitfähigkeit/Wärmekapazität
- Wärmeausdehnung
- Brandverhalten

Holz hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit, ist daher gut als Dämmmaterial einsetzbar. Die thermische Ausdehnung ist gering und wird praktisch meist vernachlässigt.

Holz ist brennbar, bei grossen Abmessungen bildet sich jedoch eine Holzkohleschicht, die das Weiterbrennen verhindert. Ein starker Festigkeitsverlust, wie er bei Stahl bei grosser Hitze auftritt, ist bei Holz nicht vorhanden.

## 5. Elastische Eigenschaften

Die Elastizität ist die Eigenschaft fester Körper, einer durch äussere Kräfte bewirkten Verformung entgegen zu wirken. Nimmt der Körper nach der Entlastung seine Ursprungsform vollständig wieder an, so spricht man von einem ideal elastischen Körper. Zwischen Spannung und Dehnung besteht bei ideal elastischen Körpern ein linearer Zusammenhang (Hookesches Gesetz). 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 aufzunehmenden Kräfte ohne unzulässige Verformung aufnehmen respektive übertragen kann.



**Abbildung 28:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Vollholz bei Zug- und Druckbelastung.

Holz und auch Holzwerkstoffe sind ein orthotropes Material. Wir haben bei Vollholz 3 E-Moduli ( $E_L$ ,  $E_R$ ,  $E_T$ ), 3 Schubmoduli ( $G_{RT}$ ,  $G_{LR}$ ,  $G_{TL}$ ) und 6 Poissonsche Zahlen. Analoges gilt für Holzwerkstoffe. Es gilt das Hookesche Gesetz, bei Berücksichtigung der Orthotropie das erweiterte Hookesche Gesetz.



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. Holz hat bei Zugbelastung nur sehr gering ausgeprägte, plastische Verformungen. Bei Druck senkrecht zur Faserrichtung sind diese jedoch wesentlich stärker ausgebildet, so dass das weniger dichte Frühholz komprimiert wird. Dies führt z.B. bei Parkett durch Quellspannungen zum Öffnen der Fugen.

Innerhalb des elastischen Bereiches gilt (Hookesches Gesetz):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \tau = G \cdot \gamma$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

$\sigma$	Spannung (N/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon$	Dehnung (-)
E	Elastizitätsmodul (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau$	Schubspannungen (N/mm <sup>2</sup> )
G	Schubmodul (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma$	Scherung (-)

Für die Poissonschen Konstanten ( $\mu$ ) von Vollholz gilt:

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

Die Eigenschaften unterscheiden sich in den 3 Hauptschnittrichtungen.

Für die elastischen Konstanten gelten folgende Verhältnisse in den Hauptachsen:

Elastizitäts-Moduln (E):	$E_T$	:	$E_R$	:	$E_L$
bei Nadelholz:	1	:	1,7	:	20
bei Laubholz:	1	:	1,7	:	13

Schub-Moduln (G):

$G_{LR}$ (Schub der Radialfläche):	$G_{LT}$ (Schub der Tangentialfläche)
bei Nadelholz (Fichte, Kiefer):	1:1
bei Laubholz:	1,3:1

Der Schubmodul  $G_{RT}$  beträgt bei Nadelholz nur etwa 10% des Schubmoduls  $G_{LT}$ . Dies kann bei schubbelasteten Bauteilen zum Versagen durch Rollschub in der RT Ebene führen. Es ist ein deutlicher Einfluss des Faser-Last-Winkels (Winkel zwischen RL und LT Richtung) und der Jahrringlage (Winkel zwischen RT) vorhanden. Die Verformung ist weitgehend elastisch. Bei hoher Holzfeuchte und auch Temperatur steigt der Anteil plastischer Verformungen (wird z.B. bei der Herstellung von Bugholz genutzt). Im praktischen Gebrauch von Holz sind plastische Verformungen gering, es kommt nicht zu einer Verfestigung wie bei Metallen. Holz ist viskoelastisch, d.h. die Eigenschaften sind zeitabhängig. Es kommt zum Kriechen und zur Spannungsrelaxation. Diese haben verzögert elastische und auch plastische Komponenten. Die Zeitabhängigkeit gilt für E, G und die Poissonschen Konstanten ebenso wie für die Festigkeitseigenschaften, bei letzteren spricht man in diesem Falle von der Dauerstandfestigkeit. Wird der mechanischen Belastung zusätzlich 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 (mechanosorptiver Effekt) ebenfalls zu berücksichtigen. Die gesamte Dehnungsrate  $\dot{\varepsilon}$  setzt sich somit zusammen aus der elastischen Dehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_{el}$ , der Quell-Dehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_{\omega}$  und der mechanosorptiven Dehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_{\omega\sigma}$  d.h.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{el} + \dot{\varepsilon}_{\omega} + \dot{\varepsilon}_{\omega\sigma}$$

## Elastizitätsmodul (E-Modul)

Der E-Modul (E) beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers, entspricht also der Steigung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms. Je höher der E-Modul, desto steifer ist das Material, je niedriger, desto nachgiebiger. Der E-Modul sinkt mit zunehmender Feuchte.

**Tabelle 9:** Ausgewählte Kenngrößen von Holzwerkstoffen (Fa. Siempelkamp u. a).

Eigenschaft	Spanplatte	MDF	OSB (Europa)	LVL	LSL	Massivholzplatte	PSL
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	680-700	760-790	660-700	660-700	650	450	660
E- Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	2600-3200	4000-4500	-	-	12000	-	14000-15500
- parallel <sup>1)</sup>	-	-	7000	13000-16000	-	5000-7000	-
- senkrecht <sup>1)</sup>	-	-	1850	-	-	1000-3000	-
Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	20-22	33-38	-	-	-	-	-
- parallel <sup>1)</sup>	-	-	36	-	-	30-50	60-65
- senkrecht <sup>1)</sup>	-	-	20-25	-	-	10-30	-
Schubmodul [N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	-	-	-
- flach	100-180	100-200	ca. 300	ca. 500	-	ca. 200	700-800
- hockkant	1000-1500	600-1000	1100	ca. 500	ca.2300	600-700	-

<sup>1)</sup>Biegung jeweils senkrecht zur Plattenebene, parallel = in Herstellungsrichtung (Faserrichtung der Decklagen, Orientierungsrichtung der Partikeln), senkrecht = Faserrichtung senkrecht zur Herstellungsrichtung (Faserrichtung der Decklagen, Orientierungsrichtung der Partikeln)

## Schubmodul

Der Schubmodul (G) beschreibt den Zusammenhang zwischen Verformungen und Querkraft oder Schubspannung.

## Poissonsche Konstante

Bei Druck- und Zugbelastung kommt es zu einer Formänderung der Probe in Belastungsrichtung und senkrecht dazu. Bei isotropen Materialien wird die Probe bei Druck kürzer und breiter, bei Zugbelastung länger und schmaler. Dabei gilt:

$$\frac{\Delta b}{b} = -\mu \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

$$\mu = -\frac{\varepsilon_{\text{quer}}}{\varepsilon_{\text{längs}}}$$

$\mu$  Poissonsche Konstante (-)

$\varepsilon$  Dehnung (%)

$l$  Länge der Probe

$b$  Breite der Probe

$\Delta l$  Längenänderung

$\Delta b$  Breitenänderung

## 6. Festigkeitseigenschaften

### Übersicht

Wichtige Festigkeitseigenschaften sind Zug-, Druck-, Biege-, Scherfestigkeit und auch die Brinellhärte; zunehmende Bedeutung gewinnt für Holz und Holzwerkstoffe auch die Bruchmechanik. Bei Vollholz ist bei kleinen, fehlerfreien Proben die Zugfestigkeit in Faserrichtung etwa doppelt so hoch wie die Druckfestigkeit. Die Biegefestigkeit liegt zwischen beiden. Die Festigkeit in Faserrichtung ist deutlich höher als senkrecht zur Faserrichtung. Sie ist radial höher als tangential. Pozgai, Chonavec, Kuriatko und Babiak (1993) geben z.B. für Fichte folgendes Verhältnis an: Zugfestigkeit: tangential: radial: längs = 1 : 1,3 : 44 (1,7 N/mm<sup>2</sup> : 2,2 N/mm<sup>2</sup> : 74,4 N/mm<sup>2</sup>), für die Druckfestigkeit: tangential: radial: längs = 1 : 0,85 : 8,5 (4,0 N/mm<sup>2</sup> : 3,4 N/mm<sup>2</sup> : 34,1 N/mm<sup>2</sup>).

Mit zunehmendem Winkel zwischen Probenlängsachse und Faserrichtung (Faser-Last-Winkel) sinken die elastischen Konstanten und die Festigkeit deutlich ab. Der Einfluss des Faser-Last-Winkels kann nach dem Gesetz von Hankinson nach (Niemz 1993) beschrieben werden.

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max P} * \sigma_{\max S}}{\sigma_{\max P} \sin^n \varphi + \sigma_{\max S} \cos^n \varphi}$$

Dabei sind:

- $\sigma_{\max P}$  Festigkeit parallel zur Faser
- $\sigma_{\max S}$  Festigkeit senkrecht zur Faser
- $\varphi$  Winkel
- $n$  Exponent, abhängig von der Belastungsart

Der Winkel zwischen radialer und tangentialer Richtung wird auch als Jahrringneigung bezeichnet und ist z.B. bei Schubbelastung in der RT-Ebene von Bedeutung. Die Festigkeit bei Nadelholz ist in der RT-Ebene etwa unter einem Winkel von 45 Grad am geringsten, radial nahezu doppelt so hoch wie tangential. An Bauholz (z.B. DIN EN 338) sind die charakteristischen Festigkeitswerte der Festigkeitsklasse C16 bei Druck (für Nadelholz z.B. 16 N/mm<sup>2</sup>) dagegen höher als bei Zug (10 N/mm<sup>2</sup>), was u.a. auf die im Bauholz vorhandenen Äste zurückzuführen ist. Für Rundholz ist eine um etwa 10% höhere Festigkeit als für Schnittholz anzusetzen, da die Fasern nicht angeschnitten sind. Sehr gering sind die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung. Die charakteristischen Werte der Druckfestigkeit senkrecht zur Faser liegen bei dieser Festigkeitsklasse nur bei 2,2 N/mm<sup>2</sup>. Die Eigenschaften von Holzwerkstoffen sind stark abhängig von deren Struktur, sie können teilweise bereits rechnerisch vorausbestimmt werden (Massivholzplatten; Sperrholz). Alle Eigenschaften sind stark feuchteabhängig. Mit zunehmender Holzfeuchte, etwa oberhalb von 5 - 8%, sinkt die Festigkeit bis zur Fasersättigung etwa linear ab. Nach Angaben des US Forest Products Laboratory bewirkt 1% Holzfeuchteänderung im Holzfeuchtebereich von 8 - 18% folgende Abnahme der Holzeigenschaften:

- Druckfestigkeit: 6%
- Zugfestigkeit: 3%
- Biegefestigkeit: 4%

Weitere Einflüsse auf die Festigkeit sind:

- Temperatur: Die Festigkeit sinkt mit steigender Temperatur.
- Mechanische oder klimatische Vorbeanspruchungen (z.B. bei Lagerung im Wechselklima).
- Bauteilgröße.

### Zug-/Druckfestigkeit

Für die Zugfestigkeit gilt:

$$\sigma_{zB} = \frac{F_{\max}}{A}$$

Die Druckfestigkeit ( $\sigma_{dB}$ ) berechnet sich analog der Zugfestigkeit aus dem Quotienten Bruchkraft ( $F_{max}$ ) zu Querschnittsfläche ( $A$ ). Bei Druckbelastung ist zwischen der Belastung in Faserrichtung und senkrecht dazu zu unterscheiden. Bei Druck senkrecht zur Faserrichtung wird meist die Spannung bei einer bestimmten Verdichtung/Zusammendrückung (z.B. 5 %) geprüft, da sich Holz stark zusammendrücken lässt und kein eigentlicher Bruch entsteht. Die Druckfestigkeit in Faserrichtung von Vollholz liegt etwa bei der Hälfte der Zugfestigkeit in Faserrichtung (siehe Einführung). Die Druckfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung ist sehr gering. Bei Nadelholz kommt es bei Druck in radialer Richtung zum Verdichten des Frühholzes. Im Holzbau muss daher bei Querdruckbelastung das senkrecht zur Faserrichtung beanspruchte Element häufig verstärkt werden, um ein Überschreiten der Bruchspannung senkrecht zur Faser zu verhindern.

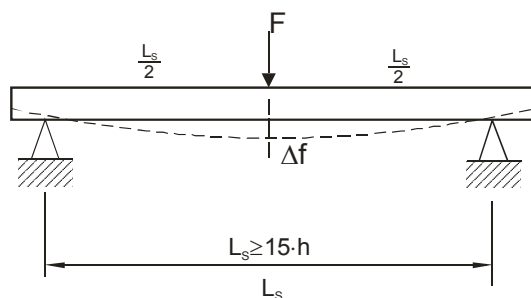
## Biegefestigkeit

**Tabelle 10:** Formeln zur Berechnung der Biegefestigkeit.

allgemein	$\sigma_{bB} = \frac{M_b}{W_b}$	$M_b$ $W_b$	Biegemoment Widerstandsmoment
Dreipunkt-Biegung	$\sigma_{bB} = \frac{F_{max} \cdot \frac{l}{4}}{\frac{bh^2}{6}}$	$\sigma_{bB}$ $F_{max}$ $l_s$ $b$ $h$	Biegefestigkeit (N/mm <sup>2</sup> ) Bruchkraft (N) Stützweite Probenbreite Probenhöhe
Vierpunkt-Biegung (Belastung in Drittelpunkten)	$\sigma_{bB} = \frac{\frac{F_{max}}{2} \cdot \frac{l}{3}}{\frac{bh^2}{6}}$		

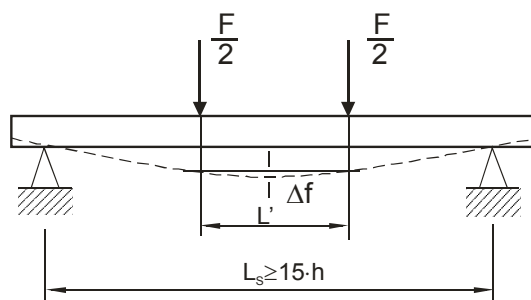
Die gebräuchlichsten Belastungsfälle bei der Materialprüfung sind der Dreipunkt-Versuch (Träger auf 2 Stützen mit mittiger Einzellast) und der Vierpunkt-Versuch (Träger auf 2 Stützen und Kräfteinleitung über 2 Punkte). Bei Biegung treten Zug- und Druckspannungen in den Randzonen auf. Je nach Belastungsfall sind bei Einwirkung von Querkraften (z.B. bei Dreipunktbiegung) Schubspannungen vorhanden, die in der neutralen Faser das Maximum erreichen.

### Dreipunktbelastung



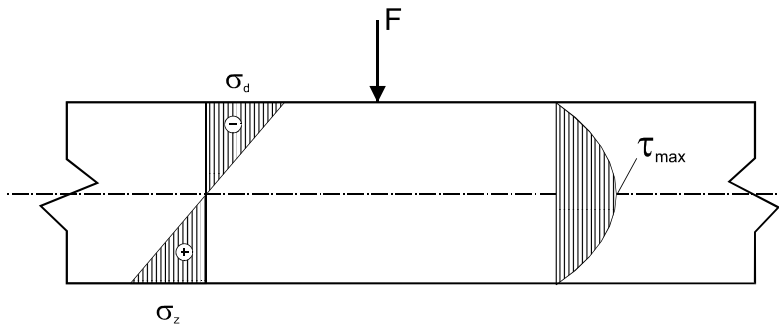
$$E = \frac{L_s^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

### Vierpunktbelastung



$$E = \frac{2 \cdot L^3 - 3 \cdot L \cdot L'^2 + L'^3}{8 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

a)



**Abbildung 29:** Biegebelastung: a) Drei- und Vierpunktbiegung; b) Idealisierte Normal- und Schubspannungen bei Dreipunktbiegung.

Bei der Vierpunktbelastung ist der mittlere Bereich zwischen den beiden Kräften schubspannungsfrei. Schubspannungen treten dort nur in den Randbereichen zwischen den Auflagern und dem Krafteintrag auf. Daher kann bei Vierpunktbelastung unter Zugrundelegung der Durchbiegung im schubspannungsfreien Bereich ein E-Modul bei reiner Biegung ermittelt werden. Bei Dreipunktbelastung ist das Ergebnis dagegen durch die auftretenden Querkräfte immer vom Schubeinfluss überlagert. Der Biege-E-Modul ist also in diesem Falle vom Verhältnis Stützweite zu Dicke abhängig. Mit zunehmender Belastung verschiebt sich infolge der Unterschiede zwischen Zug- und Druckfestigkeit bei Vollholz die Spannungsnulllinie in Richtung Zugzone, bei Holzpartikelwerkstoffen ist dies nicht der Fall, da Zug- und Druckfestigkeit etwa in gleicher Größenordnung liegen.

### Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit ist der Widerstand, den ein Körper einer Verschiebung zweier aneinander liegender (angrenzender) Flächen entgegensetzt. Bei Scherbelastung wirken zwei gegenläufig angreifende Kräftepaare. Die Scherfestigkeit berechnet sich zu:

$$\tau = \frac{F_{\max}}{a \cdot b}$$

$\tau$  Scherfestigkeit (N/mm<sup>2</sup>)  
 $F_{\max}$  Bruchlast (N)  
 $a, b$  Querschnittsabmessungen

Es gibt analog den 3 Schnittebenen von Holz 3 Scherebenen, die jeweils durch Belastung quer und senkrecht zur Faserrichtung entstehen können. Innerhalb (Scherfläche LR oder LT) einer Scherebene ist die Scherfestigkeit bei Belastung parallel zur Faserrichtung grösser als bei Belastung senkrecht zur Faserrichtung. Beim Scheren in der Hirnfläche (Belastung senkrecht zur Faser; Scherfläche RT) kommt es zunächst zu einer starken Verdichtung des Holzes, da die Druckfestigkeit senkrecht zur Faser gering ist. Erst nach dem Verdichten kommt es zum eigentlichen Scheren. Ein eigentlicher Scherbruch wird in dieser Scherebene kaum erreicht. Es wird dabei letztlich die Scherfestigkeit des verdichteten Holzes geprüft.

**Tabelle 11:** Poissonsche Konstanten für Laub- und Nadelhölzer nach Bodig und Jayne (1993).  
 1. Index: Richtung der Kraft. 2. Index: Richtung der Dehnung.

Poissonsche Konstante	Laubholz	Nadelholz
$\mu_{LR}$	0,37	0,37
$\mu_{LT}$	0,42	0,50
$\mu_{RT}$	0,47	0,67
$\mu_{TR}$	0,35	0,33
$\mu_{RL}$	0,041	0,044
$\mu_{TL}$	0,033	0,027

**Tabelle 12:** Ausgewählte Kennwerte elastischer Eigenschaften für Fichte nach verschiedenen Autoren. 1. Index: Richtung der Kraft. 2. Index: Richtung der Dehnung.

Autor	Feuchte	$E_L$ $E_R$ $E_T$	$E_L/E_R$ $E_L/E_T$ $E_R/E_T$	$G_{LT}$ $G_{LR}$ $G_{RT}$	$G_{LR}/G_{LT}$ $G_{LR}/G_{RT}$ $G_{LT}/G_{RT}$	$\mu_{RL}$ $\mu_{TL}$ $\mu_{TR}$	$\mu_{LR}$ $\mu_{LT}$ $\mu_{RT}$
	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]
DIN 68364 (1979)	12	10000 800 450	12.5 22.2 1.8	650 600	0.9	0.27	0.33
Neuhaus (1981)	13	11905 790 404	15.1 29.5 2.0	723 601 41	0.8 14.8 17.8	0.055 0.035 0.323	0.436 0.613 0.629
Krabbe <sup>1</sup>	12.2	11364 1109 430	10.3 26.4 2.6	686 742 36	1.1 20.4 18.9		
Hörig <sup>1</sup>	9.8	16234 699 400	23.2 40.6 1.7	775 629 37	0.8 17 21	0.019 0.013 0.24	0.43 0.53 0.42
Wommelsdorff <sup>1</sup>	13.7	11287 980 429	11.5 26.3 2.3			0.049 0.028 0.26	0.447 0.561 0.586
Bodig & Jayne (1982)	12	10940 830 493	13.2 22.2 1.7	663 699 66	1.1 10.6 10		
Hearmon <sup>2</sup>	12	13760 910 490	15.1 28.1 1.9	735 510 33	0.7 15.7 22.6	0.03	0.537 0.56

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

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

**Tabelle 13:** Rechenwerte für die charakteristischen Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte für Nadelholz (Auszug aus DIN EN 338).

1	Festigkeitsklasse (Sortierklasse nach DIN 4074-1)	C16 (S7)	C18	C24 (S10)	C27	C30 (S13)	C35	C40
Festigkeitskennwerte in N/mm <sup>2</sup>								
2	Biegung $f_{m,k}$	16	18	24	27	30	35	40
3	Zug parallel $f_{t,0,k}$ <sup>1)</sup>	10	11	14	16	18	21	24
4	Druck parallel $f_{c,0,k}$	17	18	21	22	23	25	26
5	rechtwinklig $f_{c,90,k}$ <sup>2)</sup>	2.2	2.2	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
6	Schub und Torsion $f_{v,k}$ <sup>3)</sup>	1.8	2	2.5	2.8	3	3.4	3.8
Steifigkeitskennwerte in N/mm <sup>2</sup>								
7	Elastizitätsmodul parallel $E_{0,mean}$ <sup>4)</sup>	8000	9000	11000	11500	12000	13000	14000
8	rechtwinklig $E_{90,mean}$ <sup>4)</sup>	270	300	370	380	400	430	470
9	Schubmodul $G_{mean}$ <sup>4)5)</sup>	500	560	690	720	750	810	880
Rohdichtekennwerte in kg/m <sup>3</sup>								
10	Rohdichte $\rho_k$	310	320	350 <sup>6)</sup>	370	380	400	420

<sup>1)</sup> Abweichend von DIN EN 338 ist der Rechenwert für die charakteristische Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes  $f_{t,90,k}$  für alle Festigkeitsklassen mit 0,4 N/mm<sup>2</sup> anzunehmen.

<sup>2)</sup> Bei unbedenklichen Eindrückungen dürfen die Werte für  $f_{c,90,k}$  um 25% erhöht werden.

- 3) Als Rechenwert für die charakteristische Rollschubfestigkeit des Holzes darf für alle Festigkeitsklassen  $f_{R,k} = 0,4 \text{ N/mm}^2$  angenommen werden.
- 4) Für die charakteristischen Steifigkeitskennwerte  $E_{0,05}$ ,  $E_{90,05}$  und  $G_{05}$  gelten die Rechenwerte:  $E_{0,05} = 2/3 \cdot E_{0,mean}$ ;  $E_{90,05} = 2/3 \cdot E_{90,mean}$ ;  $G_{05} = 2/3 \cdot G_{mean}$
- 5) Der zur Rollschubbeanspruchung gehörende Schubmodul darf mit  $G_{R,mean} = 0,15 \cdot G_{mean}$  angenommen werden.
- 6) Für Nadelholz der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074-1 darf  $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$  angenommen werden.

## 7. Rheologische Eigenschaften

Holz und Holzwerkstoffe verhalten sich viskoelastisch. Alle Eigenschaften sind also zeitabhängig. Es wird unterschieden zwischen:

- Kriechen
- Spannungsrelaxation und
- Dauerstandfestigkeit.

### Kriechen

Wird eine Probe durch eine konstante Last beansprucht, so steigt die Formänderung mit der Zeit an. Dabei treten folgende Phasen auf:

1. Primärkriechen.
2. Sekundärkriechen.
3. Tertiärkriechen.

In der Primärphase steigt die Kriechverformung zunächst stetig an, es kommt zu einem Ausrichten/Verstrecken der Moleküle und zu ersten Mikrobrüchen. In der Sekundärphase kommt es zu einer Stabilisierung der Kriechverformung. Wird die Spannung erhöht, kommt es zum Tertiärkriechen und schliesslich zum Bruch. Dieser zeichnet sich bereits frühzeitig durch einen progressiven Anstieg der Kriechverformung ab.

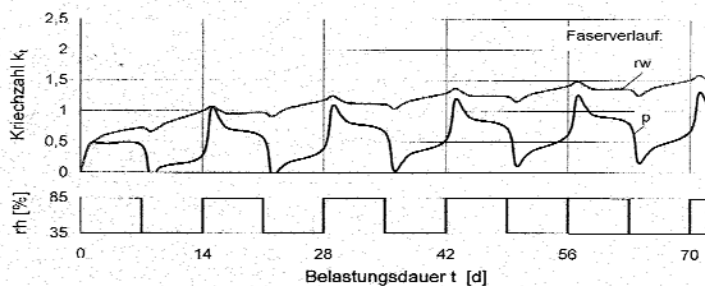
Die Kriechverformung von Vollholz wird sehr stark durch den Faser - Lastwinkel beeinflusst. Bei Belastung senkrecht zur Faserrichtung wird etwa die 8-fache Kriechzahl erreicht wie parallel zur Faserrichtung. Dadurch ist z.B. bei Massivholzplatten, OSB und LVL ein deutlicher Einfluss der Orientierungsrichtung der Decklagen vorhanden. Erfolgt die Krafteinleitung senkrecht zur Faserrichtung, ist die Kriechverformung also deutlich höher als bei paralleler Krafteinleitung. Mit zunehmendem Aufschluss der Struktur des Holzes steigt daher die Kriechverformung an. Folgende Rangordnung ergibt sich bezüglich der Grösse der Kriechverformung (von oben nach unten zunehmend):

- Vollholz
- Schichtholz / LVL/ Parallam
- Sperrholz /Massivholzplatte
- OSB
- Spanplatte
- MDF / Faserplatte.

Das Verhältnis der Kriechverformung von Holz : Spanplatte : Faserplatte beträgt etwa 1 : 4 : 5.

Mit zunehmender Holzfeuchte steigt die Kriechverformung im Konstantklima deutlich an. Im Wechselklima (wechselnde Luftfeuchtigkeit trocken/feucht) kommt es zur Überlagerung des Quellverhaltens und damit entstehender Spannungen/Dehnungen und des Kriechens. Dieser Effekt wird auch als mechanosorptives Kriechen bezeichnet. Dadurch kann die Kriechverformung z.B. bei Vollholz und teilweise bei Massivholzplatten (Decklagen parallel zur Probenlängsachse), bei Biegebelastung:

- in der Trocknungsphase (Kriechen und Schwinden des Holzes) steigen.
- in der Durchfeuchtungsphase (Kriechen und Quellen) sinken.



**Abbildung 30:** Vergleich der Kriechverformung von dreischichtigen Massivholzplatten im Wechselklima bei 20°C/85% rel. Luftfeuchte und 20°C/35% rel. Luftfeuchte und einem Belastungsgrad von 35% der Bruchlast bei Belastung in (p) und senkrecht (rw) zur Faserrichtung der Decklagen (Dube in IHD - Holzwerkstoff-Kolloquium 1999, zitiert in Dunky und Niemz (2002)).

Bei Zugbelastung steigt die Dehnung der Probe in der Adsorptionsphase (Probe quillt und wird durch den Kriechvorgang länger). In der Desorptionsphase wird die Probe durch das Schwinden kürzer und das Kriechen länger. Die Gesamtverformung steigt bei mittlerer Last in der Befeuchtungsphase und sinkt in der Trocknungsphase. Die Abnahme in der Desorptionsphase ist niedriger als der Anstieg in der Adsorptionsphase.

Bei Druckbelastung steigt die Kriechverformung in der Trocknungsphase (Probe schwindet und kriecht, wird also kürzer); in der Befeuchtungsphase wird sie durch das Quellen länger und das Kriechen kürzer. Der Gesamteffekt ist also analog der Zugbelastung, die Verformung erfolgt aber in umgekehrter Richtung.

Die gesamte Kriechverformung bei Klimawechsel (Hüllkurve von Adsorption und Desorption) steigt dagegen kontinuierlich mit der Zeit an. Analoge Effekte treten bei der Spannungsrelaxation auf. Bei Vollholz, Brettschichtholz und Sperrholz ist die Kriechverformung im Wechselklima höher als im Konstantklima. Bei Spanplatten ist im allgemeinen die Kriechverformung im Konstantklima höher als im Wechselklima (gleiche Sorptionsmaxima vorausgesetzt).

Die Gesamtverformung setzt sich aus:

- elastischer Verformung
- elastischer Nachwirkung und
- plastischer Verformung

zusammen. An der plastischen Verformung sind auch Mikrobrüche beteiligt. Sie steigt mit zunehmender Feuchte. Spanplatten haben im Gegensatz zu Voll- und Sperrholz im feuchten Konstantklima eine höhere Kriechverformung als im Wechselklima (bei gleichen Sorptionsmaxima). Der Klebstoff wirkt sich deutlich auf das Kriechverhalten aus. Bei PF-Harzen wirkt sich deren hygroskopisches Verhalten deutlich auf die Kriechverformung aus (das im PF vorhandene Alkali ist hygroskopisch). Harnstoffharz kriecht weniger als Phenolharz oder Isocyanat; PVA-Klebstoffe neigen sehr stark zum Kriechen. Die Kriechverformung steigt über Jahre hinweg an. Eine Erhöhung der Last bewirkt einen Anstieg der Kriechverformung.

### Spannungsrelaxation

Wird eine Probe konstant verformt, so sinkt die zur Aufrechterhaltung der Verformung erforderliche Spannung mit zunehmender Zeit ab. Man spricht dabei von Spannungsrelaxation. Spannungsrelaxation tritt z.B. bei vorgespannten Holzkonstruktionen wie Brücken auf, sie liegt etwa in der Größenordnung der Kriechverformung.

### Dauerstandfestigkeit

Die Dauerstandfestigkeit ist die Spannung, mit der ein Werkstoff bei unendlich langer Belastungsdauer gerade noch belastet werden kann ohne zu brechen. Auch hier wirken die gleichen Einflussgrößen, die bereits für das Kriechen und die Relaxation beschrieben wurden. Die Dauerstandfestigkeit liegt im Normalklima bei ca. 60 % der Kurzzeitfestigkeit.



## IV. Übungsaufgaben (in loser Folge; teils mit und teils ohne Lösung)

- 1) **Aus welchen Substanzen besteht das Holz anteilmässig und welches sind deren Funktionen?**

**Antwort:**

Zellulose (40 – 55 %): Gerüststoff der Holzfasern, kettenförmig, einachsig ausgerichtet (→ Anisotropie); für Zugfestigkeit verantwortlich.

Hemizellulosen (15 – 35 %): Gerüststoffe, Reservestoffe.

Lignin (20 – 30 %): Kittstoff, der in Zellulosegerüst eingelagert wird; bewirkt die Verholzung; für Druckfestigkeit verantwortlich.

Harze, Fette, Eiweisse (2 – 7 %): Schutz, Konservierung.

- 2) **Beschreiben Sie den anatomischen Aufbau von Holz im makroskopischen Bereich.**
- 3) **Nennen und erläutern Sie wichtige mikroskopische Strukturmerkmale von Laub- und Nadelholz.**
- 4) **Erläutern Sie den submikroskopischen Aufbau von Holz.**
- 5) **Was sind Holzwerkstoffe? Erläutern Sie deren Einteilung und nennen Sie 4 wichtige Holzwerkstoffe.**
- 6) **Welche Dichten werden beim Holz unterschieden (Name + Definition)?**

**Antwort:**

Reindichte: Dichte der Zellwandsubstanz. Beträgt bei allen Hölzern zwischen 1500 und 1600 kg/m<sup>3</sup>.

Rohdichte: Holzmasse pro Volumen des Holzes (inkl. Porensysteme). Die Rohdichte ist feuchteabhängig.

Darrdichte: Rohdichte des vollständig getrockneten Holzes.

Raumdichtezahl: Darrmasse pro Volumen des Holzes im fasergesättigten Zustand.

- 7) **Erläutern Sie die viskoelastischen Eigenschaften von Holz.**

**Antwort:**

Kriechen, Spannungsrelaxation, Dauerstandfestigkeit.

- 8) **Erläutern Sie das Spannungs- und Dehnungsverhalten von Vollholz bei Zug- und Druckbelastung in Faserrichtung.**

**Antwort:**

Skizze; Zugfestigkeit ca. doppelt so gross wie Druckfestigkeit.

- 9) **Welchen Einfluss hat die Dichte des Holzes auf das Quellen und Schwinden sowie die Festigkeitseigenschaften? (Skizzen und kurze Erläuterungen)**

**Antwort:**

Mit zunehmender Dichte erhöht sich das Quellen und Schwinden, da mehr Wasser (Volumen %) in die Holzsubstanz (Zellwände) eingelagert wird. Mit zunehmender Dichte nimmt auch die Festigkeit des Holzes zu.

- 10) **Welche Vorteile bieten Holzwerkstoffe gegenüber Vollholz?**

**Antwort:**

Vergütung des Holzes: z.B. Homogenisierung der Festigkeitseigenschaften, geringeres Quell- und Schwindverhalten.

Verwendung von Abfallholz.

- 11) Welche Vor- bzw. Nachteile (je 3) besitzt Holz gegenüber anderen Baumaterialien (z.B. Beton)?

**Antwort:**

Vorteile: Geringe Rohdichte bei grosser Festigkeit, leichte Transportierbarkeit und Bearbeitbarkeit, guter Wärmeschutz, gute Beständigkeit in ständig trockenem oder nassem Zustand, kurze Montagezeit, Möglichkeit zur späteren Wiederverwendung, biologisch abbaubar.

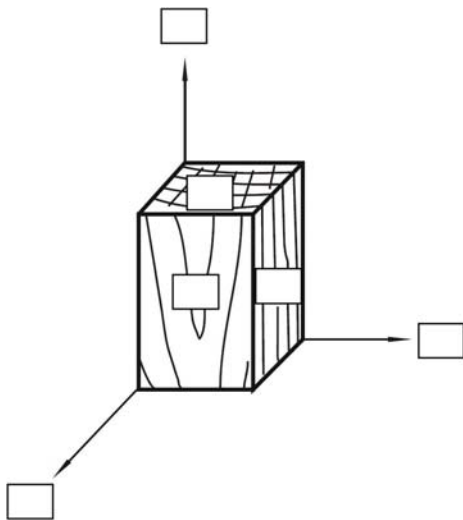
Nachteile: Geringe Beständigkeit bei Wechselklimalagerung, verhältnismässig grosse Formänderungen, inhomogen und anisotrop, leichte Zerstörbarkeit durch Feuer, pflanzliche und tierische Schädlinge.

- 12) Berechnen sie unter Verwendung der differentiellen Quellmasse (Tabelle 6) die Quellung eines Brettes (1m x 1m) bei freier Quellung:

- a) wenn Bretter mit stehenden Jahrringen verklebt wurden (Quellung radial).
- bis zum Fasersättigungsbereich.
  - wie gross ist die Quellung darüber.
- b) wenn Bretter mit liegenden Jahrringen verklebt wurden (Quellung tangential).
- bis zum Fasersättigungsbereich.
  - wie gross ist die Quellung darüber.
- c) Wie gross ist die Längenquellung.

- 13) Zeichnen Sie schematisch ein Feuchteprofil senkrecht zur Plattebene einer Holzplatte aus Fichte auf, die zunächst bis zur Gleichgewichtsfeuchte gleichmässig im Normalklima (20°C/65% rel. Luftfeuchte) klimatisiert wurde und danach für etwa 2 Wochen in einem trockeneren Klima (20°C/30% rel. Luftfeuchte) gelagert wurde. Welche Feuchte ergibt sich unmittelbar an der Probenoberfläche, welche in der Plattenmitte?

- 14) Beschriften Sie in der Abbildung die drei Hauptrichtungen und die drei Hauptebenen von Holz mithilfe der Abkürzungen L, R und T (für „longitudinal“, „radial“, „tangential“)



- 15) Berechnen Sie die Dimensionen und das Volumen eines Fichtenbrettes mit den Abmessungen 3000 mm (longitudinal) x 150 mm (radial) x 22 mm (tangential)

bei Änderung der Holzfeuchte von 6% auf 14%,  
bei Änderung der Holzfeuchte von 14% auf 32% (Fasersättigung),  
bei Änderung der Holzfeuchte von 32% auf 49%.

Zu verwendende Kennwerte (differentielle Quellung der Fichte): Radial 0,11%/ % Feuchteänderung; tangential 0,25%/ % Feuchteänderung; longitudinal: 0,009%/ % Feuchteänderung. Bitte geben Sie das Ergebnis jeweils in [mm] an (auf zwei Dezimalstellen genau).

**Antwort:**

$$L_{\text{neu}} = (100\% + 0.009\%/ \% * 8\%) * 3000 \text{ mm} = 1.00072 * 3000 \text{ mm} = \underline{3002.16 \text{ mm}}$$
$$R_{\text{neu}} = (100\% + 0.11\%/ \% * 8\%) * 150 \text{ mm} = 1.0088 * 150 \text{ mm} = \underline{151.32 \text{ mm}}$$
$$T_{\text{neu}} = (100\% + 0.25\%/ \% * 8\%) * 22 \text{ mm} = 1.02 * 22 \text{ mm} = \underline{22.44 \text{ mm}}$$

$$L_{\text{neu}} = (100\% + 0.009\%/ \% * 18\%) * 3000 \text{ mm} = 1.00162 * 3000 \text{ mm} = \underline{3004.86 \text{ mm}}$$
$$R_{\text{neu}} = (100\% + 0.11\%/ \% * 18\%) * 150 \text{ mm} = 1.0198 * 150 \text{ mm} = \underline{152.97 \text{ mm}}$$
$$T_{\text{neu}} = (100\% + 0.25\%/ \% * 18\%) * 22 \text{ mm} = 1.045 * 22 \text{ mm} = \underline{22.99 \text{ mm}}$$

Keine Dimensionsänderungen oberhalb des Fasersättigungspunktes:

$$L_{\text{neu}} = L_{\text{alt}} = \underline{3000.00 \text{ mm}}; R_{\text{neu}} = L_{\text{alt}} = \underline{150.00 \text{ mm}}; T_{\text{neu}} = L_{\text{alt}} = \underline{22.00 \text{ mm}}$$

- 16) **Berechnen Sie die Längen-, Breiten- und Dickenänderung einer Spanplatte, Platte im Format von 1m (Länge) x 1m (Breite) x 1,8cm (Dicke), bei einer Feuchteänderung von 8% auf 12%.**

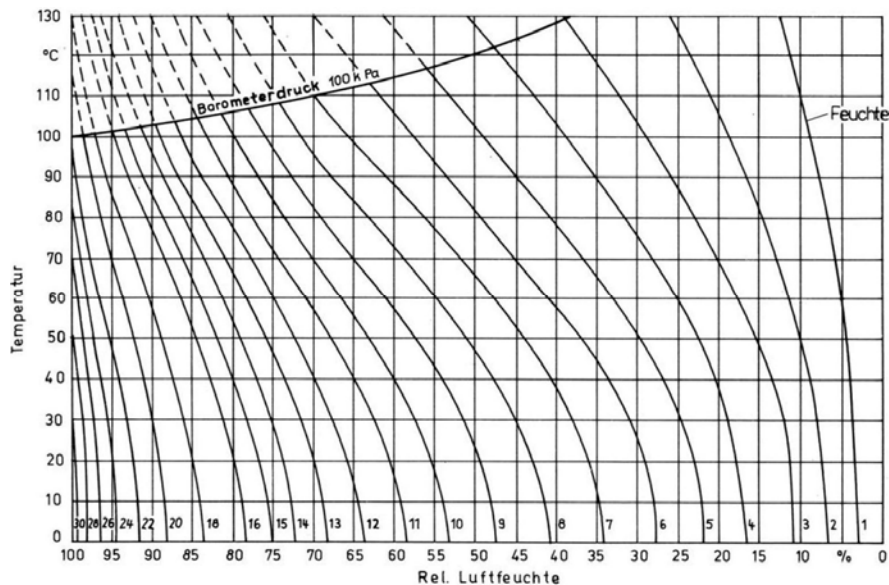
Zu verwendende Kennwerte (differentielle Quellung): In Plattenebene 0,04%/ % Feuchteänderung; senkrecht zur Plattenebene 1,1%/ % Feuchteänderung.

- 17) **Geben Sie die Gleichgewichtsfeuchte von Fichtenholz und von Spanplatten (Richtwerte) bei 20°C/65% rel. Luftfeuchte an.**

- 18) **Ein Fichtenbrett hat bei 20°C und 29% rel. Luftfeuchtigkeit die Ausgleichsholzfeuchte (6%) erreicht. Dort betragen die Abmessungen des Bretts 1950 mm (longitudinal) x 200 mm (radial) x 40 mm (tangential). Dann wird das Brett in einen Raum mit der gleichen Temperatur, aber höherer Luftfeuchtigkeit gebracht. Die Abmessungen betragen nach erneutem Erreichen der Ausgleichsholzfeuchte 1953.69 mm (L) x 207.98 mm (R) x 43.02 mm (mm). Wie hoch ist die neue Ausgleichsholzfeuchte?**

**Wie hoch ist die Luftfeuchtigkeit in dem Raum ungefähr (abzulesen im Diagramm)?**

Zu verwendende Kennwerte (differentielle Quellung der Fichte): longitudinal: 0,009%/ % Feuchteänderung; radial 0,19%/ % Feuchteänderung; tangential 0,36%/ % Feuchteänderung.



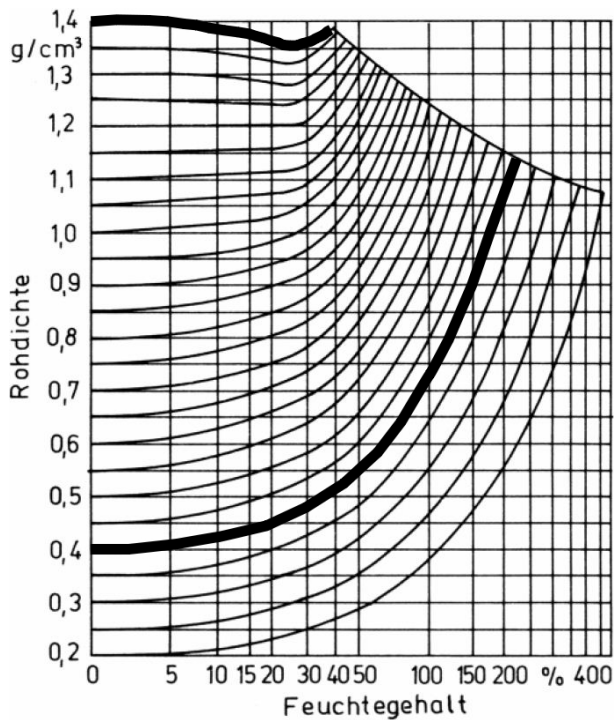
**Antwort:**

$$\text{Neue Ausgleichsholzfeuchte } \omega = 6\% + [(3.69 \text{ mm}/1950 \text{ mm}) * 100 / 0.009\%/ \%] = 27\% \text{ oder}$$
$$= 6\% + [(7.98 \text{ mm}/200 \text{ mm}) * 100 / 0.19\%/ \%] = 27\% \text{ oder}$$
$$= 6\% + [(3.02 \text{ mm}/40 \text{ mm}) * 100 / 0.36\%/ \%] = 27\%$$

Eine Ausgleichsfeuchte von 27% wird bei einer Temperatur von 20°C und einer rel. Luftfeuchtigkeit von ca. 97-98% erreicht.

- 19) Zeichnen Sie in einem Diagramm den Einfluss des Feuchtegehalts auf die Rohdichte für eine Holzart mit einer Darrdichte von 400 kg/m<sup>3</sup> und einer Darrdichte von 1400 kg/m<sup>3</sup> (die richtige Tendenz ist ausreichend, die exakten Werte sind nicht erforderlich). Welche der beiden Holzarten kann einen höheren Holzfeuchtegehalt erreichen?

Antwort:

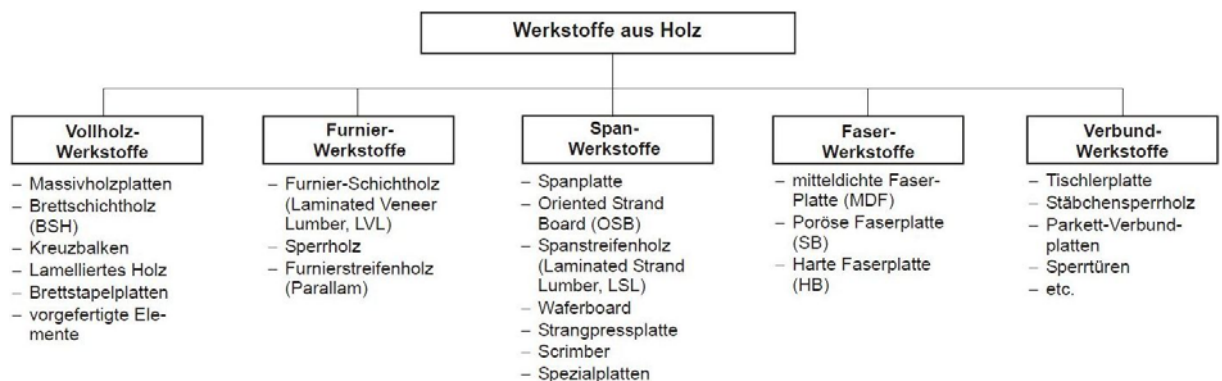


Die Holzart mit der geringeren Darrdichte kann einen höheren Holzfeuchtegehalt erreichen.

- 20) Nennen Sie vier Materialien, die häufig in der Mittellage von Holz-Verbundwerkstoffen verwendet werden. Welche weiteren vier Kategorien von Holzwerkstoffen gibt es ausser den Verbundwerkstoffen? Nennen Sie für jede dieser vier Kategorien zwei Beispiele.

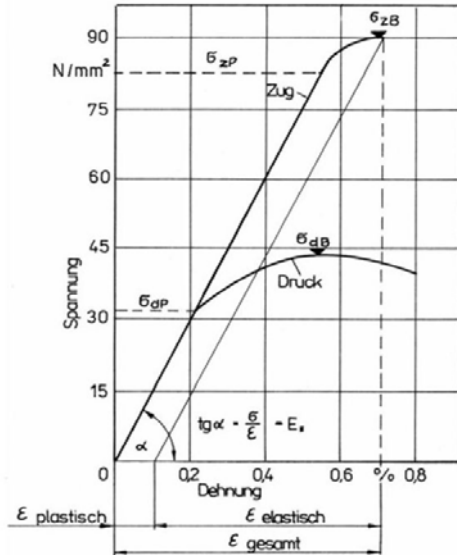
Antwort:

Vollholz, Spanplatte, Waben, Schaumstoff.



- 21) Skizzieren Sie das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Vollholz, das im Zug- und im Druckversuch in longitudinaler Richtung belastet wurde, bis zum Erreichen der Maximallast. Geben Sie grob das Verhältnis zwischen tangentialer, radialer und longitudinaler Zugfestigkeit von Fichtenholz an.

Antwort:



Verhältnis Zugfestigkeit Fichte (Skript S. 35):

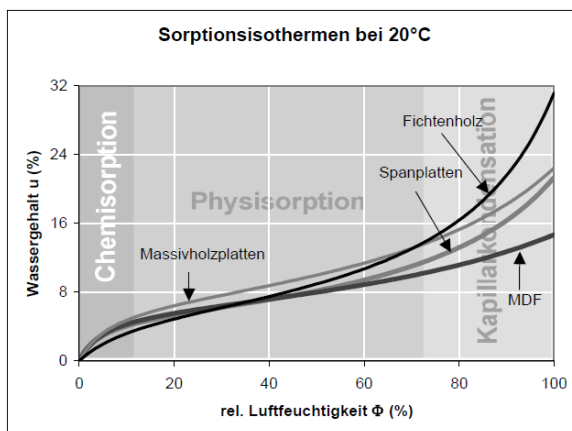
1 (T) : 1.3 (R) : 44 (L).

- 22) Skizzieren Sie in einem Diagramm die Holzfeuchtigkeit von Fichtenholz in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit (für rel. Luftfeuchtigkeiten von 0 bis 100%; das Holz ist komplett von Luft umgeben).

Kennzeichnen Sie in diesem Diagramm auch die drei Phasen des Sorptionsvorgangs.

Wie nennt man die Grenzzustände des Systems Holz/Wasser bei 0% und bei 100% relativer Luftfeuchtigkeit?

Antwort:



Darrtrocken, Fasersättigung

- 23) Ein Buchenstab wird im 4-Punkt Biegeversuch geprüft. Der Stab ist 40 cm lang, 25 mm hoch und 20 mm breit. Als Maximalkraft wird ein Wert von 3.5 kN erreicht. Berechnen Sie die Biegefestigkeit unter Verwendung folgender Gleichung:

$$\sigma_{bB} = \frac{\frac{F_{max}}{2} \cdot \frac{l}{3}}{\frac{bh^2}{6}}$$

**Antwort:**

$$\sigma_{bB} = \frac{\frac{3500 \text{ N}}{2} \cdot \frac{400 \text{ mm}}{3}}{\frac{20 \text{ mm} \cdot (25 \text{ mm})^2}{6}} = 112 \text{ N/mm}^2$$

- 24) Sind die in der Tabelle genannten Eigenschaften bei Vollholz oder bei einer Faserplatte grösser? Vervollständigen Sie die Tabelle mit den Symbolen „<“ oder „>“:

	Vollholz	Faserplatte
Festigkeit		
Aufschlussgrad		
Homogenität		
Isotropie		
Energieeinsatz		
Umweltbeeinträchtigung		
Wärmedämmung		
Oberflächengüte		

- 25) Erläutern sie die Wasseraufnahme des Holzes durch Sorption und Kapillarkräfte. Bis zu welchem Feuchtebereich tritt Sorption auf? Welche Grenzzustände des Systems Holz/Wasser gibt es?

**Antwort:**

Sorption: Wasseraufnahme aus der Luft; es stellt sich entsprechend Temperatur und rel. Luftfeuchte eine Gleichgewichtsfeuchte ein. Phasen: Chemisorption, Physisorption oder physikalische Sorption (Adsorption), Kapillarkondensation (Kondensation des Wassers in den Kapillaren); Wasserabgabe durch Desorption.

Wasseraufnahme/Abgabe aus Luft bis zur Fasersättigung (ca. 30% Holzfeuchte), das Wasser in diesem Bereich wird als gebundenes Wasser bezeichnet; darüber Wasseraufnahme durch kapillare Zugspannungen (auch als freies Wasser bezeichnet).

Grenzzustände: Darrtrocken, Fasersättigung, Wassersättigung.

- 26) Nennen Sie 3 wichtige Einflussfaktoren auf die Holzfestigkeit und erläutern Sie, wie sie die Holzfestigkeit beeinflussen.

**Antwort:**

Dichte: Mit zunehmender Dichte steigt die Festigkeit.

Faserwinkel bzw. Faser-Last-Winkel (Winkel zwischen Belastungsrichtung (Druck, Zug) und Faserrichtung): Mit zunehmendem Winkel starker Abfall der Festigkeit.

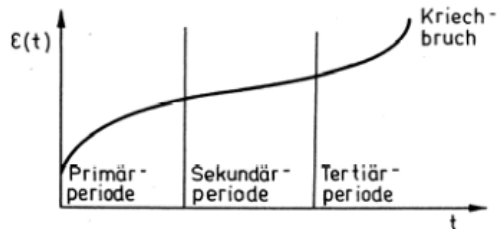
Holzfeuchte: Abnahme der Festigkeit mit Zunahme der Feuchte (bis Fasersättigung); oberhalb der Fasersättigung hat die Feuchte kaum mehr einen Einfluss auf die Festigkeit.

Jahrringlage: Radiale Festigkeit grösser als tangentielle.

- 27) Holz zeigt beim Einwirken einer Kraft viskoelastisches Verhalten. Nennen und skizzieren Sie in Abhängigkeit von der Zeit die drei Phasen der Kriechverformung bis zum Bruch.

**Antwort:**

Primär-, Sekundär-, Tertiärperiode.



- 28) Teilen Sie die Holzwerkstoffe auf Grund der Grösse der einzelnen Bestandteile (erhalten durch Zuschnitt oder anderweitigen Aufschluss des Holzes) in vier Kategorien ein. Nennen Sie für jede Kategorie ein Beispiel eines Holzwerkstoffes mit Verwendungszweck.

**Antwort:**

Vollholzwerkstoffe (z.B. Brettschichtholz (Balken, Träger); Massivholzplatten (Wand- und Deckenelemente)).

Furnierwerkstoffe (z.B. Sperrholz, Furnierschichtholz (Möbel)).

Spanwerkstoffe (z.B. Spanplatten (Möbel), OSB (Wand- und Bodenelemente)).

Faserwerkstoffe (z.B. poröse Faserplatten (Wärme- und Schallschutz); MDF (Möbel)).

- 29) Zeigen Sie anhand eines Diagramms, wie der Holzfeuchtigkeitsgehalt die Zug-, Biege- und Druckfestigkeit von Nadelholz (in Faserlängsrichtung) beeinflusst. Warum wirkt sich eine Holzfeuchtigkeitsänderung unterhalb des Fasersättigungspunktes anders auf die Festigkeit aus als diejenige oberhalb des Fasersättigungspunktes?

**Antwort:**

siehe Skript „Werkstoffe im Bauwesen“, S. 82 (Abb. 5.13).

Unterhalb des Fasersättigungspunktes wird Wasser von den Zellwänden aufgenommen, die dadurch quellen und erweichen. Oberhalb des Fasersättigungspunktes wird die Festigkeit nicht mehr durch die Feuchtigkeit beeinflusst, da Feuchtigkeit nur noch als freies Zellwasser aufgenommen wird.

- 30) Bei einem Fichtenbrett ist der E-Modul in Faserlängsrichtung ( $12000 \text{ N/mm}^2$ ) 20mal so gross wie der E-Modul senkrecht zur Faserrichtung. Berechnen Sie, wie gross der E-Modul näherungsweise ist, wenn die Belastungsrichtung um  $20^\circ$  von der Faserlängsrichtung abweicht.

**Antwort:**

$$E_{(20^\circ)} = \frac{12000 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 600 \frac{N}{\text{mm}^2}}{12000 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot (\sin(20^\circ))^3 + 600 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot (\cos(20^\circ))^3} \approx 7362 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

- 31) **Was versteht man unter Anisotropie?  
Worauf ist die Anisotropie des Holzes zurückzuführen?  
Nennen Sie fünf physikalische und/oder mechanische Eigenschaften, auf die sich die Anisotropie auswirkt.**

**Antwort:**

Abhängigkeit der Eigenschaften eines Materials von der Richtung.

Auf den strukturellen Aufbau, insbesondere die länglichen Zellen, die überwiegend in Stammlängsrichtung angeordnet sind.

Quellen & Schwinden, Wärmeleitfähigkeit, E-Modul, Schub-Modul, Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, Scherfestigkeit, Härte, etc.

- 32) **Wie verhalten sich Zug-, Druck- und Biegefestigkeit von Nadelholz in Faserrichtung in Abhängigkeit von der Holzfeuchte (Diagramm zeichnen). Begründe und vergleiche das Verhalten.**

**Antwort:**

Skizze (s. Skript „Werkstoffe im Bauwesen“, S. 82).

Durch Einlagerung von Wasser in den Zellwänden unterhalb des Fasersättigungsbereichs, quellen diese und erweichen. Dies hat eine starke Festigkeitsreduktion zur Folge (bei Druckfestigkeit am stärksten).

Oberhalb des Fasersättigungspunktes wird Wasser nur noch in den Hohlräumen eingelagert → keine weitere Festigkeitsreduktion mehr.

Zugfestigkeit ca. doppelt so hoch wie Druckfestigkeit, Biegefestigkeit liegt dazwischen (Grund: Zellaufbau: Zellulose für Zugfestigkeit, Lignin für Druckfestigkeit verantwortlich).

- 33) **Bei einem Holzhaus mit Seitenwänden aus liegenden Fichtenbalken wird das Holz in feuchtem Zustand verbaut (oberhalb Fasersättigung). Wieviel Zumasse werden bei der Aussparung der Türe (Endmasse: Breite: 80 cm; Höhe: 190 cm) benötigt, damit die Türe beim Erreichen der Ausgleichsfeuchte (12% Holzfeuchte) genau in die Seitenwand passt. Fasersättigung bei 30% Holzfeuchte; maximale Schwindmasse ( $\beta_{max}$ ): Longitudinal 0.3 %; radial 3.6 %; tangential 7.9 %).**

**Antwort:**

In der Breite:  $80 \text{ cm} \times 0.003 \times (18/30) = 0.144 \text{ cm} = 1.44 \text{ mm}$

In der Höhe:  $190 \text{ cm} \times ((0.036 + 0.079)/2) \times (18/30) = 6.555 \text{ cm} = 65.55 \text{ mm}$

- 34) **Was verstehen Sie unter dem Quellen und Schwinden des Holzes? Geben Sie die Grössenordnung für das maximale Quellmass in Faserrichtung sowie in radialer und tangentialer Richtung an. In welchem Feuchtebereich tritt Quellen und Schwinden auf? Nennen Sie ein Beispiel, wo dieser Effekt zu berücksichtigen ist.**

**Antwort:**

Volumenänderung des Holzes bei Feuchteänderung: Grössenordnung: längs 0,1-0,6%, radial 2,7-6,2%, tangential 4,8-13,4% (wichtig tangential doppelt so gross wie radial); tritt vom darrtrockenen Zustand bis zur Fasersättigung (22-35% Holzfeuchte je nach Holzart) auf; Berücksichtigung beim Einbau von nassem Holz (Schwindmass), Dehnfugen bei flächigem Verbau belassen (Fenster, Fussboden etc.).



## V. Weiterführende Literatur

### Fachbücher

- Autorenkollektiv (1990): Lexikon der Holztechnik. 4. Aufl. Leipzig, Fachbuchverlag.  
Autorenkollektiv (2003): Holzlexikon. 4. Auflage, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen.  
Bodig, J.; Jayne, B.A. (1993): Mechanics of wood and wood composites. Krieger, Florida, 712 S.  
Dunky, M.; Niemz, P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime. Springer Verlag, Berlin, 954 S.  
Halász, R. v.; Scheer, C. (Hrsg.) (1986): Holzbau-Taschenbuch. 8. Auflage, Band 1, Architektur techn. Wissenschaften, Berlin.  
Kollmann, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe (Bd. 1). 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin, 1050 S.  
Kollmann, F.; Coté, W. (1968): Principles of Wood Science and Technology. (Bd.1), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 592 S.  
Kollmann, F.; Kuenzi, E.; Stamm, A. (1975): Principles of Wood Science and Technology. (Bd.2), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 703 S.  
Niemz, P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 243 S.  
Trendelenburg R.; Mayer-Wegelin H. (1955): Das Holz als Rohstoff. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, München, 541 S.  
Willeitner, H.; Schwab, E. (1981): Holz – Aussenverwendung im Hochbau. Verlagsanstalt Alexander Koch, Stuttgart.

### Weitere Literatur

Skripte: Niemz, P., et.al. auf der e-collection der ETH  
Skript Werkstoffpraktikum (Baustoffe III, Teil Holz)

#### *Fachzeitschriften*

- Holz als Roh- und Werkstoff
- Holzforschung
- Holztechnologie

Alle in der ETH Bibliothek (meist auch elektronisch) verfügbar

### Weiterführende Lehrveranstaltungen

Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe (Master), Dozent: P. Niemz  
Grundlagen der Be- und Verarbeitung von Holz (Master D-UWIS), Dozent: P. Niemz  
Holz und Holzwerkstoffe (Dozenten: A. Frangi, M. Fontana, R. Steiger, P. Niemz)  
Zerstörungsfreie Prüfmethode (Dozenten: P. Niemz; B. Elsener)