

## 1 Der Werkstoff Holz

### 1.1 Struktur und physikalische Eigenschaften von Holz

**Holz** ist neben Lehm eines der ältesten Baumaterialien überhaupt. Der Baustoff Holz weist eine Vielzahl hervorragender bauphysikalischer Eigenschaften auf. So verfügt er über eine gute Wärmedämmfähigkeit und erfüllt eine wichtige raumklimatische Forderung: Seine Oberflächentemperatur passt sich der Raumlufttemperatur an. Außerdem reguliert Holz mit seinen Eigenschaften die Raumluftfeuchte und hält sie auf einem ausreichend hohen Niveau. Als Bauholz wird in unseren Gegenden hauptsächlich Fichte, Kiefer und Tanne sowie Eiche und Buche verarbeitet. Holz kann in vielfältiger Form wiederverwendet oder weiterverarbeitet werden. Materialgerechtes Planen und Verarbeiten garantiert die langfristige Gebrauchsfähigkeit der Holzbauteile. Besondere Aufmerksamkeit ist auf die Art der Holzverbindungen, auf Feuchte- und Brandschutz zu legen. Holz lässt sich gut verarbeiten, beispielsweise zu Balken, Lattungen, Fenstern, Türen, Böden, Treppen und Möbeln.

**Kernholz** besteht aus Zellen, die im lebendem Baum keine organischen Funktionen mehr haben, und hat, im Innern des Baumstamms liegend, nur stabilisierende Funktion. Es ist wasserärmer, und auf Grund von Einlagerungen verschiedener Substanzen fester, schwerer und dunkler als Splintholz. Für die technische Holzverwertung ist es daher besonders geeignet.

**Splintholz** befindet sich im äußeren Stammbereich und wird durch die Rinde umfasst. Im Splintholz fand das "Leben" des Baumes statt. Hier wurden Wasser und Nährstoffe transportiert. Aus diesem Grunde ist Splintholz auch besonders anfällig für Schädlingsbefall. Bei Eichenholz ist dies in so starkem Maße der Fall, dass Eichensplint nicht verarbeitet werden darf und in aller Regel noch im Sägewerk abgetrennt und verbrannt wird.

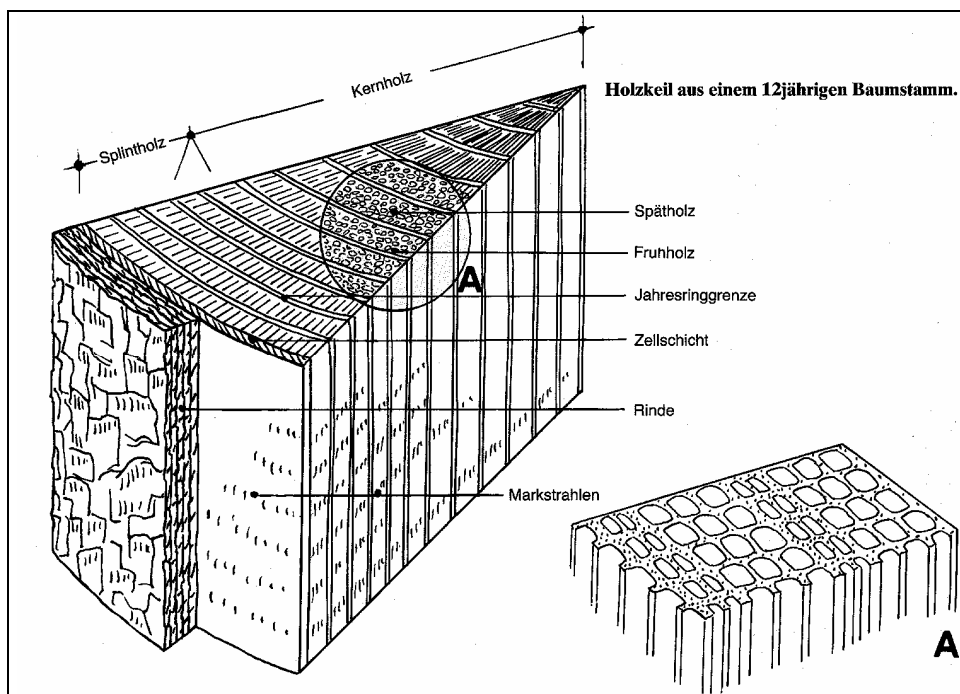
**Kernholz übernimmt in erster Linie statische Funktionen und ist weniger anfällig für Schädlingsbefall**

**Splintholz ist besonders anfällig für Schädlingsbefall**



Holz besteht aus den Holzfasern und den Zellhohlräumen. Die Wasseraufnahme findet im wesentlichen in den Zellhohlräumen (Lumen), und eingeschränkt aber auch in den Holzfasern, statt. Das spezifische Gewicht der jeweiligen Holzart wird im wesentlichen durch Anzahl und Größe der Zellhohlräume bestimmt. Die Holzfasern sind bei fast allen Holzarten praktisch gleich und das spezifische Gewicht beträgt nahezu einheitlich ca. 1,5 g/cm<sup>3</sup>. Holz weist in den verschiedenen Schnittrichtungen unterschiedliche Strukturen und Eigenschaften auf. Man unterscheidet Querschnitt (man sieht auf das Kopfholz) und die Längsschnitte: Radialschnitt (vom Mark bis zur Rinde) und den Tangentialschnitt (quer zur Stammmitte). Die Holzmaserung sieht in diesen Schnittrichtungen jeweils unterschiedlich aus.

Dazu nachfolgende Skizze:



## 1.2 Chemischer Aufbau

Insbesondere hinsichtlich dem Befall durch holzerstörende Pilzen und Insekten ist die chemische Zusammensetzung von Holz von Wichtigkeit.

Der chemische Aufbau von Holz wird nach den Aspekten Elementarzusammensetzung und Bestandteile unterschieden. Die Elementarzusammensetzung, somit die enthaltenen chemischen Substanzen, ist für unterschiedliche Holzarten sowie für verschiedene Bestandteile eines Baumes wie Stamm, Äste oder Wurzel weitgehend gleich. Es kann von nachstehenden Durchschnittswerten ausgegangen werden:

Chemisches Element	Anteil
Kohlenstoff	ca. 50%
Sauerstoff	ca. 43%
Wasserstoff	ca. 6%
Stickstoff und Mineralien	ca. 1%

Die Holzsubstanz besteht im wesentlichen aus folgenden chemischen Bestandteilen:

Chemische Bestandteile	Anteil
Cellulose	ca. 40 bis 50 %
Lignin	ca. 20 bis 35 %
Polyose	ca. 15 bis 35 %
Sonstiges	ca. 1 bis 3 %

**Cellulose** ist eine komplizierte großmolekulare Substanz (kann künstlich nicht hergestellt werden) und bildet das eigentliche Zellgerüst. Sie stellt die Gerüstsubstanz der Holzzellwände dar und dient vornehmlich der Zugfestigkeit. Die langen fadenförmigen Molekülketten sind zu Einheiten, den sogenannten Fibrillen, zusammengelagert. Die Funktion der Cellulose kann vereinfacht mit der Wirkung der Bewehrung in Stahlbeton verglichen werden. Seine Farbe ist weißlich hell.



**Lignin** sorgt als Bindemittel für den festen Verbund der Cellulose. Es sorgt für die Druckfestigkeit in dem es die Zellwände umhüllt, was letztlich zur Verkernung der Zellen führt. Seine Farbe ist bräunlich.

**Polyosen** sind kurzkettige Moleküle. Ihre Funktion kann verallgemeinert als Kittsubstanz oder Verbindungsmittel zwischen den Gerüstsubstanzen Cellulose und Lignin angesehen werden.

Neben den zellwandaufbauenden Molekülen kommen eine Reihe von Inhaltsstoffen wie u.a. Harze, Öle, Fette, Gerbstoffe, Kautschuk oder Säuren vor. Diese Stoffe weisen in den jeweiligen Nadel- und Laubholzarten sehr unterschiedliche Zusammensetzung auf und sind verantwortlich z.B. für Farbgebung, Geruch, Oberflächenbeschaffenheit oder Widerstandsfähigkeit gegen Pilze und Insekten.

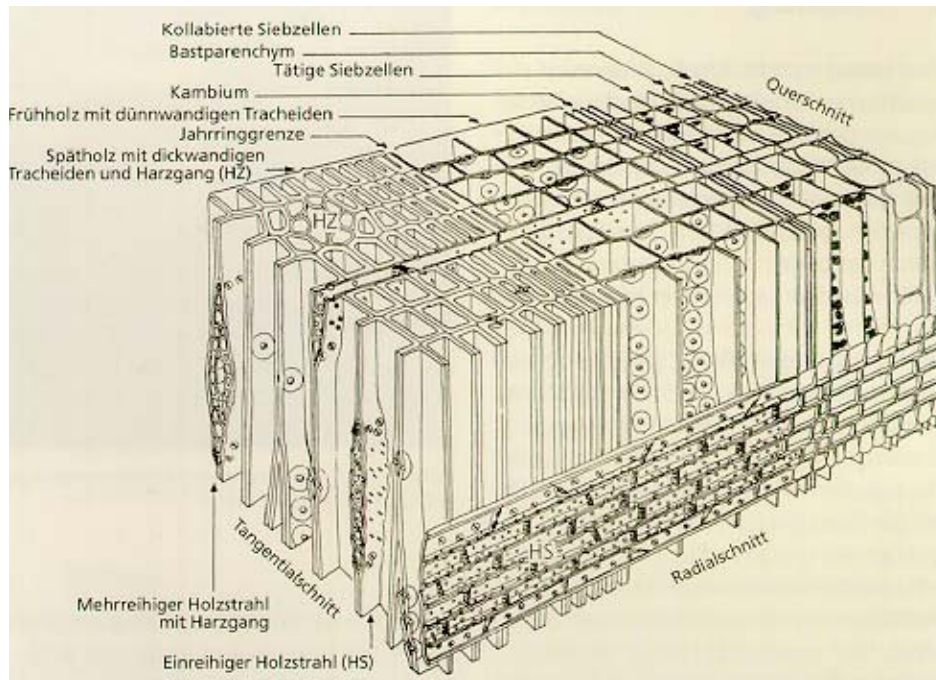
Je nach Art des Schädlings werden mehr Cellulose- oder Ligninbestandteile abgebaut. Wird hauptsächlich Cellulose abgebaut, so verbleibt das bräunliche Lignin, man spricht von Braunfäule. Wird mehr Lignin abgebaut, so spricht man von Weißfäule, da die helle Cellulose über bleibt. Es ist so ein erster Hinweis auf die Art des Schädlings gegeben.

Die chemischen Bestandteile von Holz umfassen im wesentlichen die drei zellwandaufbauenden Stoffe Cellulose, Polyosen und Lignin. Diese drei Substanzen sind hochmolekular und verleihen aufgrund ihrer Struktur den Zellwänden des Holzes ihre Festigkeit.



### 1.3 Anatomischer Aufbau

Holz im Sinne des technischen Bau- und Werkstoffes wird durch das sekundäre Dauergewebe von Stämmen und Ästen gebildet. Der Holzkörper besteht aus Millionen einzelner Zellen mit unterschiedlicher Größe, Art und Verteilung. Gleichartige Zellen können in größeren Verbänden, dem Gewebe, auftreten.



Struktureller Aufbau von Nadelholz (Lohmann Handbuch Holz)

Hinsichtlich ihrer Funktion wird das Holzgewebe in drei Gruppen unterschieden:

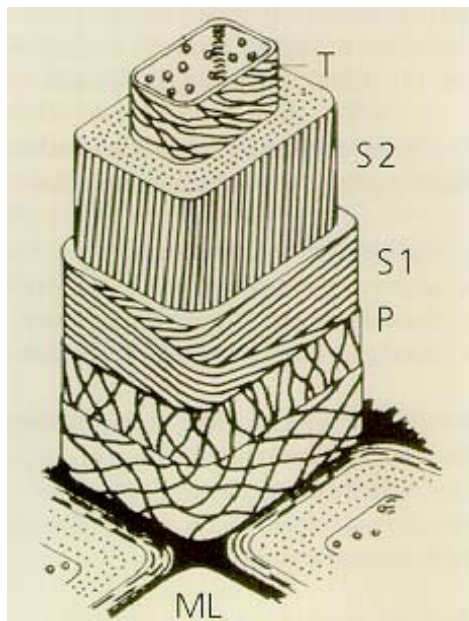
- mechanische Festigung
- Nährstoffleitung und -transport
- Speicherfunktion

Bei **Nadelhölzern** wird das Festigungsgewebe durch **Tracheiden** gebildet, die zugleich dem Nährstofftransport dienen.

**Laubhölzer** hingegen besitzen als festigende Struktur **Libriformfasern** und teils **Fasertracheiden**, während der Nährstofftransport durch separate Gefäße übernommen wird.

Das **Speichergewebe** besteht **bei allen Hölzern** aus den sogenannten **Parenchymzellen** (= Speicherzellen). Größtenteils verlaufen die Holzfasern in Längsrichtung zur Stammachse. In Querrichtung hierzu („radial“) zeigen sich als Holzstrahlen bezeichnete Zellbänder. Diese Zellen übernehmen die radiale Leitung und Speicherung von organischen Stoffen.

Nebenstehende Abbildung zeigt schematisch die verschiedenen Schichten von Holzzellwänden (**Tracheiden** des Nadelholzes sowie **Libriformfasern** bei Laubhölzern). Diese Darstellung lässt die hohe Resistenz von Holz als „High-Tech-Verbundwerkstoff“ in besonderer Weise erahnen. Die einzelnen Wandschichten (Mittellamelle ML, Primärwand P, Sekundärwände S1 und S2, Tertiärwand T) mit unterschiedlicher Richtung der Holzfasern umschlingen und festigen sich gegenseitig.



## 1.4 Technische Eigenschaften

Für die physikalischen und technologischen Eigenschaften des Holzes sind zunächst das Festigkeits- und Nährstoffleitgewebe verantwortlich.

### 1.4.1 Mechanische Eigenschaften von Holz

Holz besitzt eine äußerst hohe mechanische Festigkeit. Die Festigkeit einer fehlerfreien Holzfaser ist deutlich höher als die Festigkeit von Stahl. Dabei ist das günstige Verhältnis von Festigkeit zum Eigengewicht ausschlaggebend. Dies wird durch die Reißlänge ausgedrückt. Damit wird beschrieben wie lang ein Stab sein kann, bevor er frei aufgehängt durch sein eigenes Gewicht abreißt.

Werkstoff	Reißlänge
Holz	15.000 m
Stahl ST37	4.700 m

Ansonsten sind folgende technische Eigenschaften von Bedeutung:

	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche
Rohdichte, g/cm <sup>3</sup>	0,43	0,49	0,68	0,65
Wärmeleitzahl, $\lambda$ , W/(m*K)	0,083	0,120	0,130	0,130
E-Modul, kp/cm <sup>2</sup>	110.000	120.000	160.000	130.000
Druckfestigkeit, längs, kp/cm <sup>2</sup>	500	550	620	650
Druckfestigkeit, quer, kp/cm <sup>2</sup>	58	77		110
Zugfestigkeit, längs, kp/cm <sup>2</sup>	900	1.100	1.350	900
Zugfestigkeit, quer, kp/cm <sup>2</sup>	38	30	107	90

### 1.4.2 Das Verhalten von Holz gegenüber Temperatureinflüssen

Bei Temperaturschwankungen unterliegen Stoffe jeglicher Art Dimensionsschwankungen. Der materialspezifische Längenausdehnungskoeffizient ist bei Holz im Vergleich zu anderen Werkstoffen sehr gering und braucht für Standsicherheitsbetrachtungen daher im Regelfall nicht berücksichtigt zu werden.

Auch bei hohen Temperaturen tritt über längere Zeiträume hinweg keine thermische Zersetzung ein. Erst oberhalb von 60–80 °C finden allmähliche, mit steigender Temperatur sich beschleunigende chemische Veränderungsprozesse statt.

Aus der nachstehenden Tabelle ist zu erkennen, dass das Längenausdehnungsverhalten bei Werkstoffen aus Kunststoff gegenüber Metall und Holz erheblich abweicht. So wird etwa im Automobilbau ein verstärkter Einsatz von neu entwickelten Holz- und Holzverbundwerkstoffen angestrebt.

Werkstoff	Längenausdehnungskoeffizient
Aluminium	24 m x 10 <sup>-6</sup> /°K
Stahl V2A	16 m x 10 <sup>-6</sup> /°K
Guss	12 m x 10 <sup>-6</sup> /°K
<b>Holz</b>	5 m x 10 <sup>-6</sup> /°K
Polyamid	120 m x 10 <sup>-6</sup> /°K
Polyäthylen	200 m x 10 <sup>-6</sup> /°K
PVC	175 m x 10 <sup>-6</sup> /°K

Aufgrund seines anatomischen Aufbaus mit dünnen Zellwänden und zwischenliegenden Hohlräumen ist der Werkstoff Holz das Vorbild vieler synthetischer Dämmstoffe. Neben hoher Festigkeit besitzt er hiermit sehr gute Wärmedämmeigenschaften.



Nachstehende Tabelle weist die raumseitige Oberflächentemperatur und Grenzfeuchte für Tauwasserausfall an verschiedenen Baustoffen aus, bei

ϑ außen = 0 °C,

ϑ innen = 20 °C,

Materialstärke 100 mm

Baustoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	Oberflächentemperatur innen $t_i$ [°C]	Grenzfeuchte rel. Luftf. [%]
Aluminium	200	4,7	36,7
Stahl	60	4,8	37,0
Guss	50	4,8	37,0
V2A-Stahl	15	5,3	38,1
Beton	2,1	8,2	46,1
Polyethylen	0,4	13,8	67,6
Holz	0,13	17,1	84,1

Unter dem Grenzfeuchtegehalt der Innenluft versteht man den Feuchtegehalt der Innenraumluft, ab welcher mit Tauwasserbildung gerechnet werden muss.

Unter diesen vorgegebenen klimatischen Voraussetzungen wäre beispielsweise bei Einsatz von Stahl oder Guss ab einer Luftfeuchte von 37–38%, welche durchaus als „trocken“ gilt, mit Schwitzwasser an Bauteiloberflächen zu rechnen. In nahezu allen Anwendungsfällen dieser Schrift werden solche Grenzwerte deutlich überschritten. Bei Verwendung von Holz ist bei den obigen Klimabedingungen mit Tauwasser beginnend ab ca. 84% Luftfeuchte zu rechnen. Dieser als „schwül“ empfundene Wert wird in vielen Anwendungen in Industrie, Technik und Freizeit höchstens kurzfristig erreicht. Konstruktionen in Holz bleiben daher in vielen Anwendungsfällen auch ohne zusätzliche Wärmedämmschichten tauwasserfrei.



### 1.4.3 Das Verhalten von Holz gegenüber Feuchteinflüssen

Der Feuchtegehalt von Wasser in Holz hängt insbesondere von den beiden Faktoren Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit ab. Daneben spielt der Luftdruck eine eher untergeordnete Rolle. Holz nimmt Wasser in zwei verschiedenen Arten auf. Zunächst reichern sich die Zellwände damit an. Sind diese gesättigt, füllen sich alsdann die Zellenhohlräume. Der Zustand, bei dem die Hohlräume gerade kein Wasser mehr enthalten, wird als **Fasersättigungsbereich** bezeichnet. Er liegt bei Nadelhölzern etwa bei 30% Holzfeuchte.

An überdachten oder gegen Bewitterung geschützten Holzkonstruktionen stellen sich Holzfeuchtwerte ein, welche deutlich niedriger sind als bei Fasersättigung. Bei Feuchteaufnahme oder -abgabe unterhalb des Fasersättigungsbereiches treten bei Holz in radialer und tangentialer Richtung (entlang der Jahrringe und in Querrichtung hierzu) Quell- und Schwinderscheinungen auf, die konstruktiv berücksichtigt werden. In Faserlängsrichtung sind diese Verformungen vernachlässigbar gering.

In Abhängigkeit zur baulichen Situation und Feuchtebeanspruchung werden daher Nutzungsklassen definiert, welche die klimatischen Verhältnisse der Umgebung des Bauwerks während seiner Lebensdauer kennzeichnen und für die Konstruktion und statische Bemessung berücksichtigt werden:

#### **Nutzungsklasse I**

Feuchtegehalt in Holzbaustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 65% übersteigt (z.B. beheizte Innenräume).

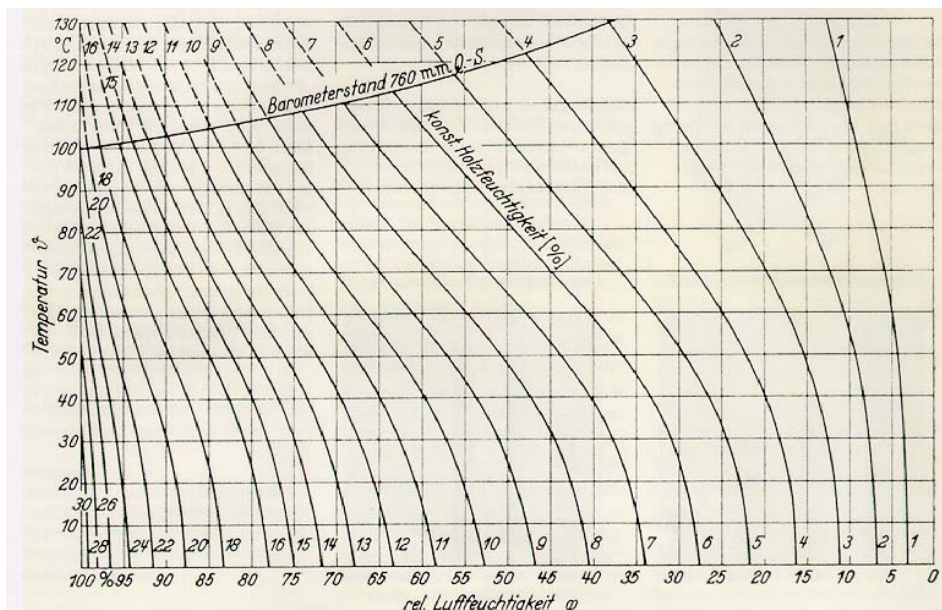
#### **Nutzungsklasse II**

Feuchtegehalt in Holzbaustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 85% übersteigt (überdachte, offene Tragwerke, z.B. Stallungen, industrielle Löse- und Tränkprozesse).



### Nutzungsklasse III

Klimabedingungen, welche regelmäßig zu höheren Feuchtegehalt in Holzbaustoffen führen als in Nutzungsklasse II (der Witterung ausgesetzte Baustoffe oder z.B. intensiv genutzte Nassräume bzw. industrielle Verfahren mit ständig hohem Wasserdampfanzfall).



Ausgleichsfeuchte von Holz in Abhängigkeit zu Umgebungstemperatur und relativer Luftfeuchte

In der Praxis haben sich folgende Feuchtegehalte der Holzwerkstoffe als zweckmäßig erwiesen (DIN 1052-1 Abschnitt 4.2.1):

Parkett (bei Fußbodenheizung)	ca. 8 %
Innenausbau in beheizten Räumen	ca. 9 %
Fenster und unbeheizte Innenräume	ca. 12 %
Überdachte offene Bauteile (Dachstühle unbeheizt)	ca. 15 %
Frei bewitterte Holzbauteile	ca. 18 %

In der Regel wird sich die Holzfeuchte jeweils in einer Bandbreite von  $\pm 3,0$  % und im frei bewitterten Bereich in einer Bandbreite von  $\pm 6,0$  % einstellen.

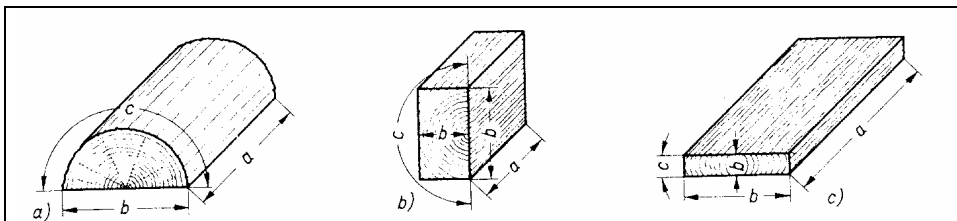


## 1.4.4 Schwinden und Quellen von Holz

Holz ist ein natürlicher Baustoff, der, je nach Klima, Lage und Bodengüte, unterschiedlich schnell wächst. Dies führt zu Unterschieden in Gewicht, Festigkeit, Maserung und sonstigen Eigenschaften. Besonders von Bedeutung ist dabei, dass Holz "arbeitet". Darunter versteht man, dass das Holz bei sich veränderndem Klima (Temperatur und Luftfeuchte) sein Volumen in den drei Dimensionen unterschiedlichen verändert. Man spricht hier von **Anisotropie**.

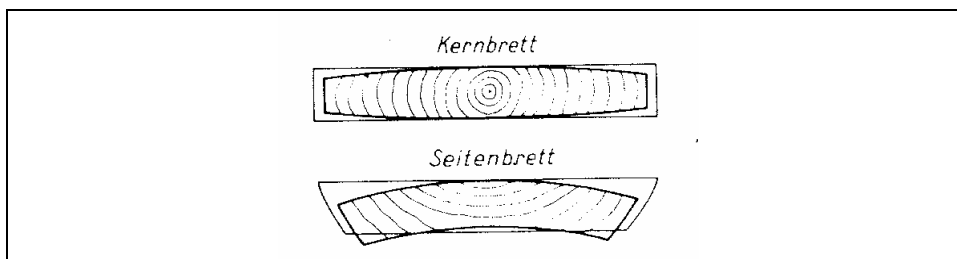
Um diesen Umstand zu verdeutlichen sind folgende Schwundgrade aufgeführt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| a) Längsrichtung:      | ca. 0,3 % (je nach Holzart von 0,1 bis 1,0 %) |
| b) Radialrichtung:     | ca. 5,0 % (je nach Holzart von 2 bis 10 %)    |
| c) Tangentialrichtung: | ca. 10,0 % (je nach Holzart von 4 bis 15 %)   |



Die in den drei Richtungen unterschiedlich starke Volumenänderung führt zu Spannungen, wodurch Risse entstehen und sich das Holzbauteil verformt. Man spricht vom "Werfen" des Holzes. Daher ist es wichtig, dass das Bauholz für den entsprechenden späteren Verwendungszweck getrocknet bzw. konditioniert wird. Je langsamer dies geschieht, um so weniger Risse und Verformungen entstehen. Daher kann man teilweise beobachten, dass in Sägewerken zum Trocknen gelagertes Schnittholz beregnet wird. Dadurch wird gewährleistet, dass das Holz langsam von innen nach außen trocknet. Wird das Holz an der Oberfläche zu schnell getrocknet, wobei der innere Bereich noch hohe Feuchtigkeit aufweist, so kommt es zu Spannungen und die Oberflächen wird rissig.

**Zu schnelle Trocknungsvorgänge führen zur Rissbildung im Holz.**



Hinsichtlich der technischen Beurteilung des Schwindverhaltens von Holz ist zunächst der Begriff der Holzfeuchte zu definieren:

$$u = \frac{G_u - G_o}{G_o} \times 100 \%$$

Dabei ist: u Holzfeuchtigkeit in %  
 G<sub>o</sub> Trockengewicht der Holzprobe (Darrtrocken)  
 G<sub>u</sub> Feuchtgewicht der Holzprobe

Das Arbeiten des Holzes (Schwinden und Quellen) aufgrund von Feuchteschwankungen kann nunmehr rechnerisch wie folgt ermittelt werden.

$$\Delta b = \Delta u \times V \times \frac{b}{100 \%$$

Dabei ist: Δb Breitenänderung des Holzelements in mm  
 Δu Holzfeuchteänderung in %  
 V differenzielles Schwindmaß der Holzart in %/  
 B Breite des Holzelements in mm

## Schwindmaße

In der nachstehenden Tabelle wird für verschiedene Holzarten und Holzwerkstoffe das differenzielle Schwindmaß V in % je 1 % Feuchteänderung abhängig von den Schnittebenen des Holzes aufgelistet:

Holzart	Differenzielles Schwindmaß V %/%		
	radial	tangential	mittel
Ahorn	0,15	0,26	0,21
Birke	0,21	0,29	0,25
Buche	0,20	0,41	0,31
Eiche	0,16	0,36	0,26
Esche	0,21	0,38	0,30
Fertigparkett (3-lagig abgesperrt)	0,03	0,03	0,03
Fichte	0,19	0,39	0,29
Kiefer	0,19	0,36	0,28
Lärche	0,14	0,30	0,22

Je kleiner das differenzielle Schwindmaß, desto weniger quillt oder schwindet Holz!



**Beispiele:**

200 mm breites Fertigparkett und 2 % Feuchteänderung:

$$\Delta b = 2 \times 0,03 \times \frac{200}{100 \%} = 0,12 \text{ mm}$$

100 mm breites Fichtenbrett und 5 % Feuchteänderung:

$$\Delta b = 5 \times 0,29 \times \frac{100}{100 \%} = 1,45 \text{ mm}$$

50 mm breite Eichendiele und 4 % Feuchteänderung:

$$\Delta b = 4 \times 0,26 \times \frac{50}{100 \%} = 0,52 \text{ mm}$$

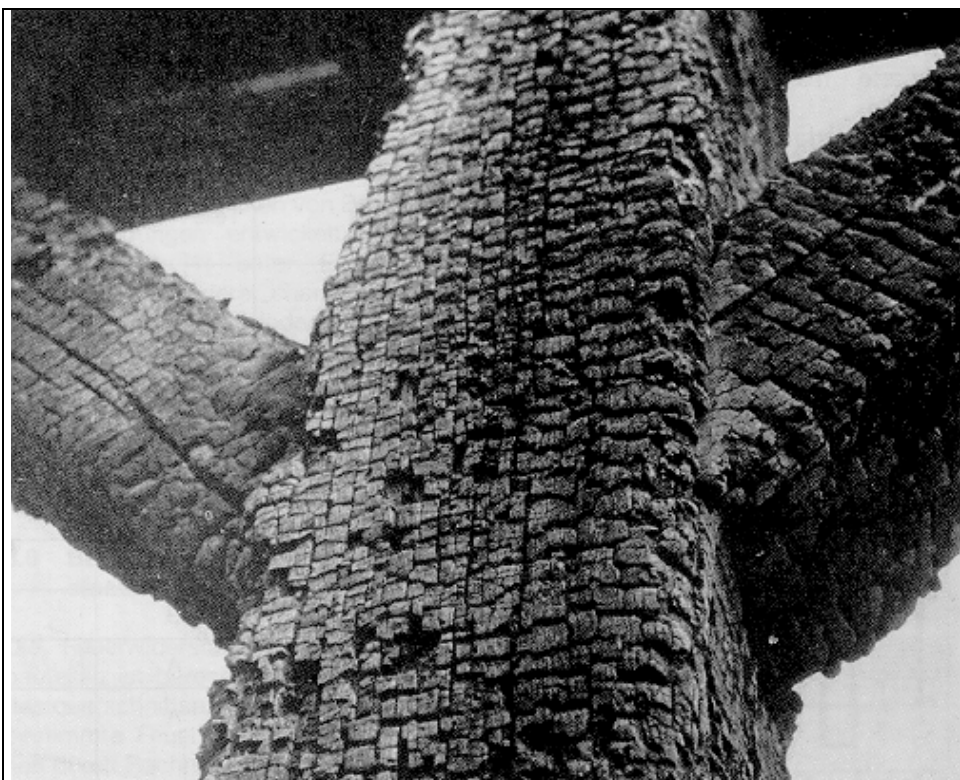
200 mm breite Ahorndiele und 5 % Feuchteänderung, tangentielle Richtung:

$$\Delta b = 5 \times 0,26 \times \frac{200}{100 \%} = 2,60 \text{ mm}$$



### 1.4.5 Brandverhalten von Holz

Holz ist brennbar! Gemäß DIN 4102 wird es der Baustoffklasse B2 (normal entflammbar) zugeordnet. Dennoch verhält es sich im Vergleich zu anderen Baustoffen im Brandfall eher unproblematisch. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit und vor allem die rasche Entstehung einer als Wärmedämmung wirkenden Verkohlungsschicht führen zu geringen Abbrandraten. Anders als bei Stahl- oder Stahlbetonkonstruktionen kündigung Holzkonstruktionen im Brandfall ihr Versagen an und versagen nicht schlagartig. Von Vorteil ist auch der Umstand, dass selbst bei Brandbelastung keine wesentlichen Temperaturdehnungen auftreten.

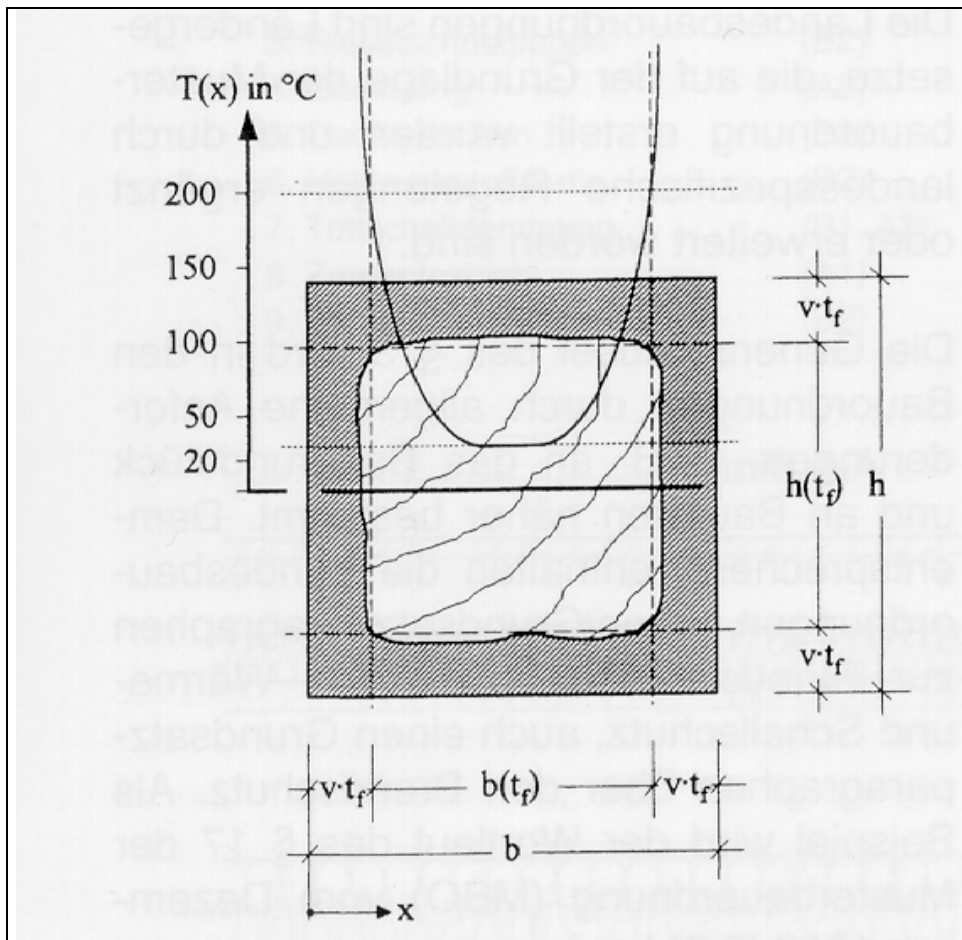


Brandbeanspruchte Vollholzstütze mit Kopfbändern

Nebenstehende Tabelle aus der DIN 4102-4 gibt folgende Abbrandraten für Bauholz im Brandfall an:

	Holzart		Abbrandgeschw. v in mm/min
	Allgemein	Randbedingungen	
1	BSH	Nadelholz einschl. Buche	0,7
2	Vollholz	Buche	0,8
3	Vollholz	Laubholz mit $\rho > 600 \text{ kg/m}^3$ außer Buche	$0,56 = 0,7 \cdot 0,8$





Temperaturverlauf für einen Holzbalken mit vierseitig beanspruchtem Querschnitt

Mit den festgelegten Abbrandraten können die Restquerschnitte nach einer bestimmten Brandbeanspruchungsdauer berechnet werden. Der verbleibende Restquerschnitt wird bemessen und muss im Brandfall vorhandene Belastungen weiterhin sicher aufnehmen können. Ein vierseitig beanspruchter Querschnitt, wie der in obenstehender Grafik dargestellte Stützenquerschnitt von beispielsweise 160 X 160 mm BSH, besitzt damit nach 30 Minuten Brandbeanspruchung noch eine Restbreite von:

$$b(t_f = 30 \text{ min}) = 160 \text{ mm} - 30 \times 0,7 \times 2 = \mathbf{118 \text{ mm}}$$

