

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

IfB

Institut für Baustoffe
Institute for Building Materials

Physik des Holzes

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Niemz, ETH Zürich, Institut für Baustoffe,
Holzphysik
Mail: niemz@ibwk.baug.ethz.ch
<http://www.ifb.ethz.ch>

Oktober 2004

Inhalt:

- 1 Übersicht zu den wesentlichen Holzeigenschaften und wichtigen Einflussfaktoren
- 1.1 Einteilung der Holzeigenschaften
- 1.2 Wesentliche Einflussfaktoren auf die Eigenschaften
- 2 Verhalten gegenüber Feuchte
- 2.1 Sorptionsverhalten und kapillare Wasseraufnahme
- 2.2 Quellen und Schwinden
- 3 Dichte
- 4 Thermische Eigenschaften
- 5 Elektrische Eigenschaften
- 6 Optische Eigenschaften
- 7 Akustische Eigenschaften
- 8 Alterung und Beständigkeit
- 9 Elastomechanische und rheologische Eigenschaften
- 9.1 Übersicht zu wichtigen Einflussgrößen
- 9.2 Elastizitätsgesetz und Spannungs-Dehnungsdiagramm
- 9.2.1 Grundlagen
- 9.2.2 Einflussfaktoren
- 9.3 Rheologische Eigenschaften
- 9.4 Festigkeitseigenschaften
- 9.4.1 Zugfestigkeit
- 9.4.2 Druckfestigkeit
- 9.4.3 Biegefestigkeit
- 9.4.4 Scher- und Spaltfestigkeit
- 9.4.5 Härte
- 9.4.6 Sonstige Eigenschaften
- 9.4.7 Wichtige Einflussfaktoren auf die Festigkeitseigenschaften
10. Literaturverzeichnis

Anlagen

Vorwort

Das vorliegende Skript ist lediglich eine kurze Einführung in die physikalischen Eigenschaften des Holzes. Holzwerkstoffe und deren physikalische Eigenschaften werden im Skript Holztechnologie II des Verfassers behandelt.

Das Skript ist für Studenten mit Holz als Nebenfach gedacht. Als weitergehende Literatur wird empfohlen:

F. Kollmann: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage, Springer Verlag 1951

Bodig, J.; Jayne, B.A.: Mechanics of wood and wood composites. Krieger, Florida, 1993, Vorreiter, L.: Holztechnologisches Handbuch. Bd. 1; Verlag G. Fromme 1949

Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW Verlag 1993

Dunky, M.; Niemz, P. Holzwerkstoffe und Leime. Springer Verlag 2002.

Wichtige Fachzeitschriften zum Fachgebiet sind:

Holz als Roh- und Werkstoff: Springer Verlag
Wood Science and Technology: Springer Verlag
Holzforschung: Verlag De Gryter

Wichtige Internetadressen:

<http://www.lignum.ch/>

<http://vifaholz.tib.uni-hannover.de>

<http://www.holzweb.net/index.php>

http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete/fg_wald/rubrik2/holzinfos

http://www.statistik.admin.ch/stat_ch

1 Übersicht zu den wesentlichen Holzeigenschaften und wichtigen Einflussfaktoren

1.1 Einteilung der Holzeigenschaften

Gemäß Abb. 1. werden die Eigenschaften eingeteilt in physikalisch-mechanische, biologische und chemische.

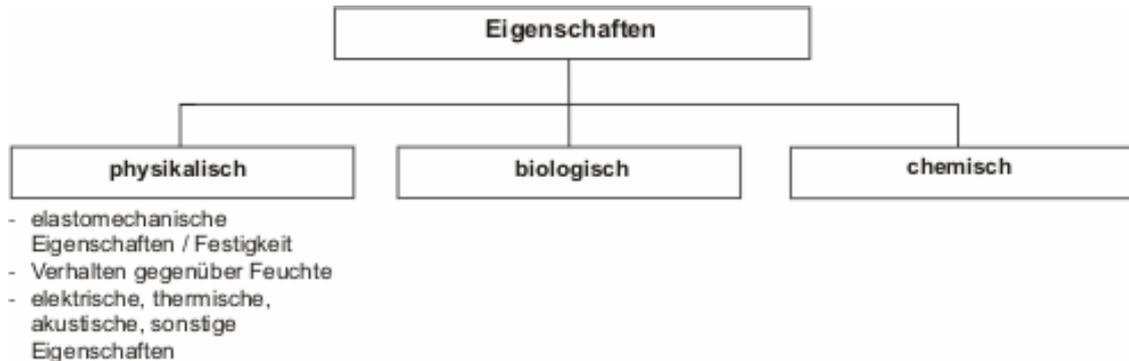


Abb. 1. Einteilung der Eigenschaften von Holz

Physikalisch- mechanische Eigenschaften

Zu dieser Gruppe zählen im erweiterten Sinne (Niemz 1993):

Physikalische Eigenschaften

- Verhalten gegenüber Feuchte (Holzfeuchte, Diffusion, Quellen und Schwinden)
- Dichte
- Thermische Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Brandverhalten)
- Elektrische Eigenschaften
- Akustische Eigenschaften

Elastomechanische Eigenschaften und Festigkeitseigenschaften (Elastizitätsgesetz)

- Elastomechanische Eigenschaften (E- Modul, Schubmodul, Poissonsche Konstanten)
- Festigkeitseigenschaften (z. B. Zug-, Druck-, Biege- und Scherfestigkeit)
- Rheologische Eigenschaften (Kriechen, Relaxation, Dauerstandfestigkeit).

Biologische Eigenschaften

Darunter wird die Beständigkeit gegenüber Mikroorganismen (Pilze, Insekten, Bakterien) verstanden.

Chemische Eigenschaften

Darunter werden z. B. der pH-Wert und die Art und der Anteil an Holzinhaltstoffen eingeordnet. Von Bedeutung sind diese Eigenschaften z.B. beim Verkleben oder bei der Kombination verschiedener Holzarten (z. B. Verfärbung durch Eisen als Verbindungsmittel bei Eiche).

1.2 Wesentliche Einflussfaktoren auf die Eigenschaften

Alle Eigenschaften des Holzes werden beeinflusst durch:

- den strukturellen Aufbau (z.B. Rohdichte, Schnitttrichtung, Jahringbreite, Faserlänge). Die Eigenschaften variieren stark sowohl innerhalb des Stammes als auch mit dem Standort. Auch das Alter des Holzes hat einen gewissen Einfluss. Juveniles Holz (im Zentrum des Stammes im Bereich der Markröhre liegendes Holz) hat andere Eigenschaften als adultes. Die ersten Jahringe sind weitlumiger und haben eine geringere Dichte.
- die Umweltbedingungen (insbesondere Feuchte und Temperatur)
- die Vorgeschichte (z. B. mechanische oder klimatische Vorbeanspruchung, Schädigung durch Pilze oder Insekten).

Die Eigenschaften des Holzes streuen erheblich stärker als die von Holzwerkstoffen. Zur groben Orientierung dienen folgende Variationskoeffizienten für Vollholz (Holzlexikon 2003):

für die Rohdichte: $v=10\%$

für die Biegefestigkeit: $v= 16\%$

für den E-Modul: $v= 22\%$

für die Bruchschlagarbeit: $v= 30\%$

Die Schnitttrichtung beeinflusst alle Eigenschaften massgeblich. Holz kann stark vereinfacht als inhomogenes und orthotropes Materialsystem mit den 3 Hauptachsen längs, radial und tangential betrachtet werden.

Die Prüfmethodik (Probengeometrie, Belastungsgeschwindigkeit, Art der Belastung d. h. Zug, Druck, Biegung, Schub) ist von entscheidendem Einfluss auf das Prüfergebnis.

Die an kleinen, fehlerfreien Proben bestimmten Eigenschaften sind meist nicht direkt auf Bauteile übertragbar. Dies betrifft sowohl mechanische Eigenschaften als auch das Quellen und Schwinden.

In den Anlagen sind wesentliche Normen zu Holz und eine Auswahl von Materialkennwerten zu Vollholz zusammengestellt.

Für tieferegehende Kenntnisse wird auf die im Anhang aufgeführten Fachbücher verwiesen.

2. Verhalten gegenüber Feuchte

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

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100 (\%) \quad (Gl. 1)$$

| | |
|-----------|---|
| u | Feuchtegehalt |
| m_u | Masse des Holzes im feuchten Zustand |
| m_{dtr} | Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand (ohne Wasser) |

2.1 Sorptionsverhalten und kapillare Wasseraufnahme

Grenzzustände des Systems Holz-Wasser

Holz ist ein kapillarporöses System. Sowohl in die Makro- (Abb.2a) als auch die Mikroporen (Poren in Zellwandsystem, Abb.2b) des Holzes können sich Wassermoleküle einlagern. Die durch den anatomischen Aufbau bedingten Poren haben einen Durchmesser von 10^{-1} bis 10^{-5} cm; die durch den molekularen Aufbau bedingten Poren 10^{-5} bis 10^{-7} cm (Popper 1985).

Wir unterscheiden 3 Grenzzustände des Systems Holz-Wasser:

- Darrtrocken (kein Wasser vorhanden, Holzfeuchte 0%)
- Fasersättigung (das gesamte Mikrosystem der Zellwand (intermicellare und interfibrillare Hohlräume) ist maximal mit Wasser gefüllt, liegt etwa bei 28%, ein gewisser Einfluss der Holzart ist vorhanden)
- Wassersättigung (Mikro- und Makrosystem maximal mit Wasser gefüllt; liegt je nach Dichte des Holzes zwischen 770% (Balsa) und 31% (Pockholz), Trendelenburg und Mayer-Wegelin (1955)).

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.

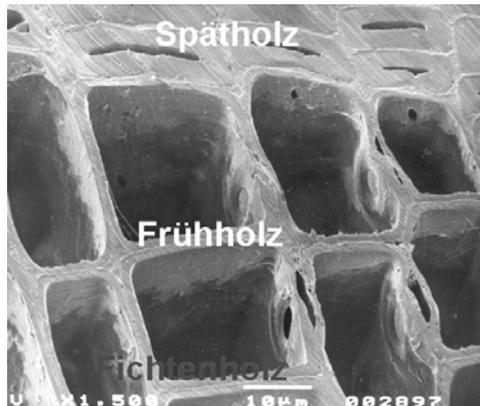
Sorptionsverhalten

Holz hat eine grosse spezifische innere Oberfläche. Sie liegt z.B. bei Fichte, berechnet nach der Hailwood- Horrobin-Theorie bei etwa $220\text{m}^2/\text{g}$. 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 (Abb. 3b). Bei Desorption ist die Holzfeuchte um 1-2% höher als bei der Adsorption (siehe z.B. (Niemz (1993))).

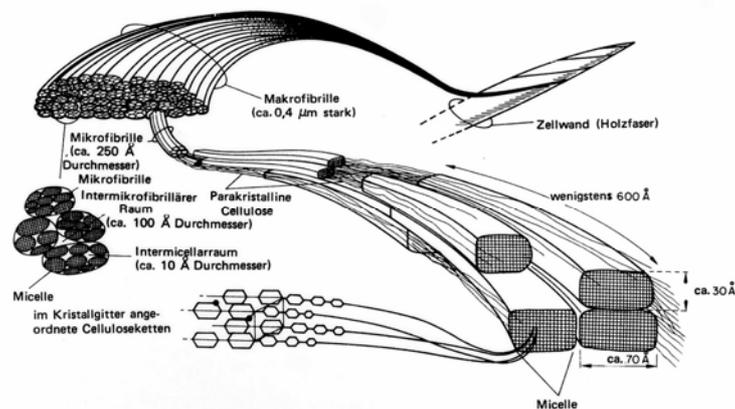
Die Feuchteaufnahme und -bindung wird dabei getrennt in

- Chemisorption (Bildung einer monomolekularen Wasserschicht)
- Physisorption (Bildung einer polymolekularen Wasserschicht)
- Kapillarkondensation (Kondensation des Wassers in Kapillaren, Sättigungsdruck in Kapillaren ist niedriger als über ebener Oberfläche (z. B. Kapillarradius $r=1,06 \cdot 10^{-4}\text{cm} = \text{rel. Dampfdruck } 99,9\%$; $r = 0,86 \cdot 10^{-7}\text{cm} = 30\% \text{ rel. Dampfdruck}$, Burmester (1970)).

Abbild. 3a zeigt die 2 Phasen des Sorptionsvorganges am Beispiel von Radiata pine und den Einfluss einer thermischen Vorbehandlung in einem belüfteten Trockenschrank.



a)



b)

Abb. 2. Porensystem des Holzes

- a) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Fichte (Querschnitt)
- b) Submikroskopischer Aufbau (Zeichnung U. Schmidt)

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 durch Diffusion.

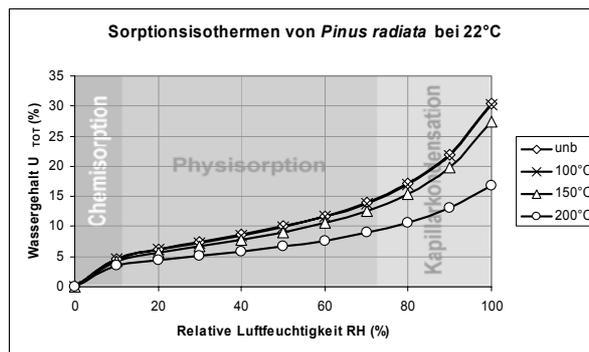
Durch Tüpfelverschluss (z.B. bei Fichte) oder Verthyllung der Laubhölzer (z.B. bei Akazie) wird die kapillare Feuchteaufnahme stark reduziert, was sich auch beim Tränken in einer geringen Tränkmittelaufnahme äußert. Das Sorptionsverhalten kann z.B. durch die **Hailwood-Horrobin-Sorptionstheorie** (HH-Sorptionstheorie) oder die **Brunauer-Emmet-Teller-Sorptionsmethode** (BET-Methode) beschrieben werden (siehe Popper, Niemz, Eberle 2001).

Durch thermische oder hydrothermische Vorbehandlung (z.B. auch Hochtemperaturtrocknung) kann die Gleichgewichtsfeuchte des Holzes reduziert werden (siehe z.B. Burmester 1975). Abb. 3.a) zeigt dies. Eine wesentliche Reduzierung der Holzfeuchte tritt etwa ab 200°C auf. Nach Burmester (1975) führt eine Wärme-Druckbehandlung zu

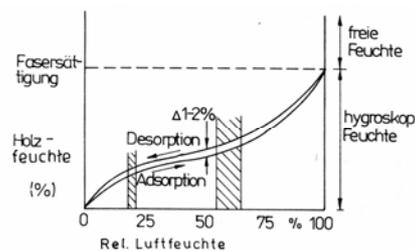
einer Verminderung des Hemicellulosegehaltes und dadurch zu einer verringerten Holzfeuchte und einer verbesserten Formbeständigkeit. Durch die thermische Behandlung bei Temperaturen zwischen 180 - 240°C wird die Gleichgewichtsfeuchte und das Schwindverhalten von Holz um bis zu 50 % reduziert. Auch durch Acetylierung und Phtalierung kann eine wesentliche Reduzierung der Gleichgewichtsfeuchte und eine Dimensionsstabilisierung erreicht werden. Bei der Acetylierung wird die sorptiv aktive Oberfläche reduziert (Popper und Bariska 1972, 1973, 1975). Eine weitere Möglichkeit ist z. B. das Ausfüllen der Zellwandhohlräume (z.B. mit Polyäthylenglykol).

Bei allen drei genannten Verfahren wird die Beständigkeit gegen holzerstörende Pilze teilweise verbessert. Thermomechanisch verdichtetes Holz hat eine etwas geringere Gleichgewichtsfeuchte als normales Vollholz. Erfolgt eine hydrothermische Behandlung und eine Verdichtung gleichzeitig, wird die Gleichgewichtsfeuchte gegenüber normalem Holz deutlich reduziert (Navi und Girardet 2000).

Durch das hygroskopische Verhalten des Holzes wird das Wohnraumklima wesentlich beeinflusst. Wohnräume mit einem höheren Holzanteil haben bei wechselndem Außenklima geringere Schwankungen der relativen Luftfeuchte als solche mit nichthygroskopischen Materialien. Holz leistet so einen messbaren Beitrag zur Verbesserung der Wohnbehaglichkeit (Okano (1978)).



a)



b)

Abb. 3: Sorptionsverhalten von Holz

a) Phasen der Sorption für Radiata pine bei verschiedener thermischer Behandlung im belüfteten Trockenschrank und Phasen der Sorption

b) Hysterese-Effekt in der Trocknungsphase

Diffusion

Unterhalb der Fasersättigung erfolgt der Feuchtetransport überwiegend durch Diffusion. Als Kenngröße wird die Diffusionswiderstandszahl μ verwendet.

Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ eines Stoffes (DIN 52615, auch als Diffusionswiderstandsfaktor benannt) ist der Quotient aus dem Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten der Luft δ_D und dem des betreffenden Stoffes und gibt an, wie vielmal grösser der Diffusionsdurchlasswiderstand des Stoffes ist als der einer gleich dicken ruhenden Luftschicht gleicher Temperatur.

Die Diffusionswiderstandszahl von Holz ist von der Holzfeuchte und der Dichte abhängig. Sie steigt mit abnehmender Feuchte und zunehmender Rohdichte. Für diffusionsoffene Konstruktionen werden daher Werkstoffe mit geringer Rohdichte verwendet.

Wasseraufnahme durch Kapillarkräfte

Holz kann bei Wasserlagerung oder Schlagregen auch Wasser durch Kapillarkräfte aufnehmen. Der Flüssigkeitstransport erfolgt dabei von weiten zu engen Kapillaren.

Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme wird dabei entscheidend beeinflusst durch:

- die Dichte des Materials (mit zunehmender Dichte sinkt die Aufnahmegeschwindigkeit)
- die anatomische Richtung des Holzes (in Faserrichtung ist die Feuchteaufnahme deutlich höher als senkrecht dazu)
- die Holzart
- eine vorhandene Oberflächenbeschichtung
- die Abmessungen der Bauteile.

Kenngrosse für die Wasseraufnahme durch kapillare Zugspannungen (flüssiges Wasser wie Schlagregen) ist der Wasseraufnahmekoeffizient. Dieser wird nach prEN ISO 15148 bestimmt und in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$ angegeben.

Er beträgt nach eigenen Messungen:

Bei Fichte:

| | |
|-------------|-------|
| Längs: | 0,017 |
| Radial: | 0,003 |
| Tangential: | 0,004 |

Bei Buche:

| | |
|-------------|-------|
| Längs: | 0,044 |
| Radial: | 0,005 |
| Tangential: | 0,004 |

Bei Lärche:

| | |
|-------------|--------|
| Längs: | 0,0047 |
| Radial: | 0,0020 |
| Tangential: | 0,0021 |

Bei Spanplatten (Dichte 670 kg/m^3):

| | |
|-----------------------------|--------|
| In der Plattenebene: | 0,025 |
| Senkrecht zur Plattenebene: | 0,0014 |

Die Wasseraufnahme in Faserrichtung ist pro Zeiteinheit deutlich höher als radial und tangential. Diese Differenzierung gilt auch für die Feuchteaufnahme aus der Luft. Daher wird bei grossen Querschnitten, wie sie z. B. im Bauwesen (Brettschichtholz) vorkommen, nur nach einer sehr langen Lagerdauer die Gleichgewichtsfeuchte über dem gesamten Querschnitt erreicht. Dies gilt auch für die Feuchteaufnahme bei Wasserlagerung. So ist es bei Fichte im trockenen Zustand sehr schwierig, eine vollständige Wiederbefeuchtung zu erreichen. Auch die Tränkbarkeit von Holz korreliert mit der Wasseraufnahme. Unter realen Bedingungen schwankt die Feuchte meist nur in den Randzonen stärker. Infolgedessen kommt es auch bevorzugt zur Spannungsbildung und Rissbildung in diesen Zonen, wobei die Schnitttrichtung die Rissbildung wesentlich beeinflusst. Wird eine Probe während der Wasseraufnahme am Quellen behindert, kommt es zu einer reduzierten Feuchteaufnahme.

2.2 Quellen und Schwinden

Bei der Feuchteänderung innerhalb des hygroskopischen Bereiches (bis zur Fasersättigung) kommt es zu Dimensionsänderungen. Oberhalb der Fasersättigung kann beim sogenannten Zellkollaps teilweise eine Volumenänderung durch kapillare Zugspannungen auftreten.

Bei Feuchteaufnahme kommt es zum Quellen, bei Feuchteabgabe zum Schwinden. Das Quell- und Schwindverhalten in den 3 Hauptschnitttrichtungen unterscheidet sich wesentlich. In Faserrichtung ist das Quellen und Schwinden gering. Holz quillt in Radialrichtung (Richtung Holzstrahlen) 10 - 20mal und tangential 15 - 30mal stärker als in Faserrichtung (Abb. 4). Mit zunehmender Rohdichte steigt die Quellung an. Zudem bestehen große Unterschiede im Quellverhalten zwischen den Holzarten. Durch Wärmebehandlung (Temperatur etwa ab 150°C bis 200°C) kann das Quell- und Schwindverhalten wesentlich reduziert werden. Häufig wird anstelle der maximalen Quell- bzw. Schwindmasse (Dimensionsänderung vom maximal gequollenen Zustand bezogen auf den Darrzustand) die differentielle Quellung in % Quellung pro % Feuchteänderung angegeben (%/%).

Tabelle 1: 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 |

Tabelle 2: Holzfeuchte

| Einsatzfall | Holzfeuchte in % |
|-------------------------------|------------------|
| Schnittholz für Wohnraummöbel | 8-10 |
| Schnittholz für Bauzwecke | 12-18 |
| Inneneinbauten | 8-12 |
| Heizkörperverkleidungen | 6-8 |

Wird Holz am Quellen bzw. Schwinden behindert (z.B. auch 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. So wurde das Quellen des Holzes bereits in der Antike zum Sprengen von Steinen verwendet. Ein großer Anteil des durch die Einlagerung des Wassers in das Mikrosystem des Holzes auftretenden Quelldruckes wird durch innere Reibung und plastische Verformungen im Holz selbst abgebaut. Der an der Gesamtprobe messbare Quelldruck ist daher deutlich niedriger als der theoretisch berechenbare. Der Quelldruck ist in feuchter Luft höher als bei Wasserlagerung. Mit zunehmender Dichte des Holzes steigt der Quelldruck, er ist in Faserrichtung höher als senkrecht dazu. Im Labor wurden Quelldrücke bis etwa 30N/mm^2 gemessen (Perkitny (1960); Krauss (1988)).

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 Feuchtaufnahme des Holzes deutlich verzögert werden.

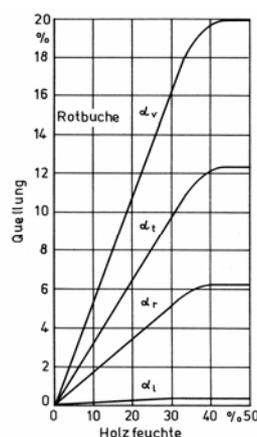


Abb.4: Quellverhalten von Rotbuche in Abhängigkeit von der Holzfeuchte und den Schnittrichtungen

Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtegehaltes

Als Basismethode dient die Darrmethode. Dabei wird die Probe im feuchten und im darrtrockenen Zustand gewogen. Zur Bestimmung der Darrmasse erfolgt eine Trocknung bei 103°C bis zur Massekonstanz. Anschliessend wird die Probe in einem Exsikkator abgekühlt, und die Masse im darrtrockenen Zustand ermittelt. Der Feuchtegehalt wird nach Gl. 1 berechnet.

Weitere Methoden sind (vgl. Niemz 1993)

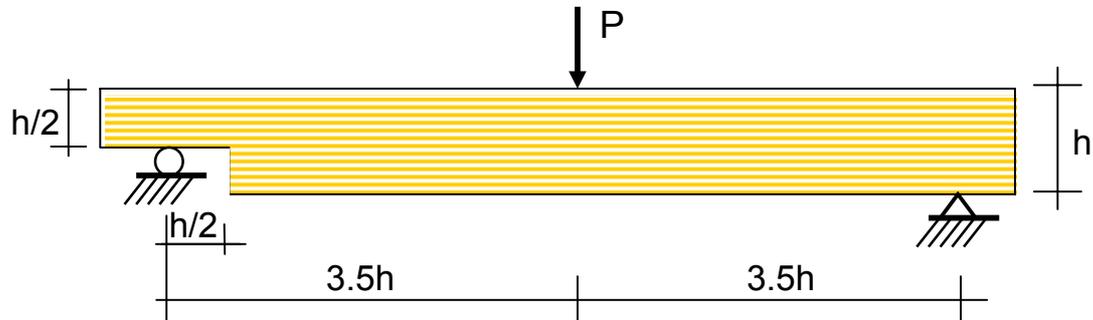
- die elektrische Widerstandsmessung (on- und offline)
- Mikrowellenverfahren
- die dielektrische Feuchtemessung
- optische Verfahren auf Basis der NIR- Spektroskopie
- die Neutronenradiographie; mit dieser Methode können lokale Feuchteverteilungen auch quantitativ nachgewiesen werden (Lehmann, Vontobel, Niemz et al. 2000)

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 Brett-schichtholz), wird bei Klimawechsel die dem Klima entsprechende Gleichgewichtsfeuchte meist nur in den Randzonen erreicht. Durch die dabei auftretende Quellungsbehinderung zwischen feuchten und trockenen Schichten ist die Quellung der Bauteile deutlich geringer als bei kleineren Proben bei Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte über dem vollen Probenquerschnitt. 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 z.B. durch Überlagerung von mechanischer Zugbelastung und Schwinden in den Randzonen eines Balkens dazu kommen, dass Holz in der Trocknungsphase unter Dauerlast versagt, in der Befeuchtungsphase dagegen nicht, da sich mechanische Belastung und Schwindspannungen addieren, in der Befeuchtungsphase dagegen subtrahieren (Abb. 5).

a)
Versuchsaufbau



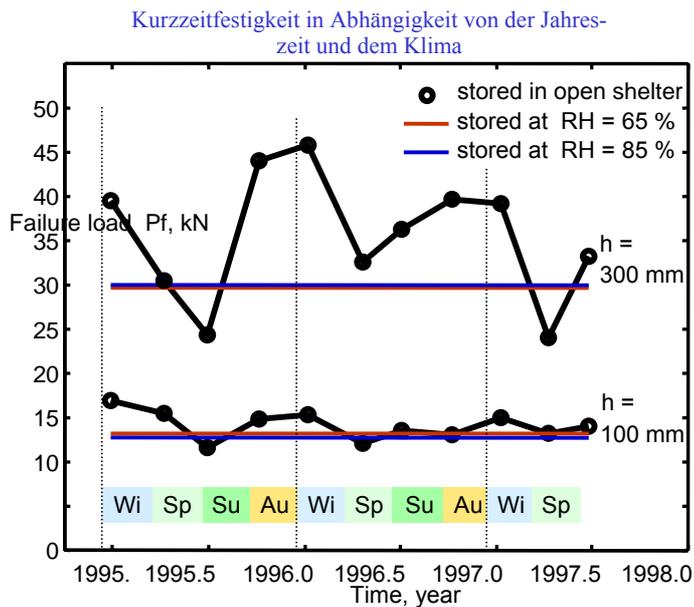
Geometrie:

Höhe: = 100 mm oder 300 mm

Breite: = 90 mm

Material:

Brettschichtholz aus Fichte, C35, Dichte 475 kg/m^3 , Holzfeuchte 12%



b)

Abb. 5: Bruchlast eines Balkens bei variabler Feuchte im Konstantklima und jahreszeitliche (luftfeuchtebedingte) Schwankungen (nach Gustafsson, Hoffmeyer und Valentin (1998))

- a) geprüfter Balken
- b) Verlauf der Festigkeit

3. Dichte

Die Rohdichte ist eine der wichtigsten Eigenschaften des Holzes. Sie beeinflusst nahezu alle Eigenschaften massgeblich (z.B. Festigkeit, Quell- und Schwindmaße, Wärmeleitfähigkeit). So steigen mit zunehmender Dichte Festigkeit und Quellung, es sinkt die Wärmeleitfähigkeit. Die Dichte variiert zwischen den einzelnen Holzarten in einem weiten Bereich von 100kg/m^3 (Balsa) bis 1200kg/m^3 (Pockholz). Die Rohdichte berechnet sich zu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{in kg/m}^3 \quad (\text{Gl. 2})$$

| | |
|--------|-----------|
| ρ | Rohdichte |
| m | Masse |
| V | Volumen |

Infolge des hygroskopischen Verhaltens des Holzes ist die Dichte feuchteabhängig. Abb. 6 zeigt den Einfluss der Feuchte auf die Rohdichte (DIN 52182).

Es wird daher meist unterscheiden in:

- Darrdichte (Masse darrtrocken/Volumen darrtrocken)
- Normal-Rohdichte (Dichte im Normalklima bei $20^\circ\text{C}/65\%$ rel. Luftfeuchte), für die meisten europäischen Hölzer ist dabei die Holzfeuchte 12%
- Raumdichtezahl (Masse darrtrocken/Volumen im maximal gequollenen Zustand)
- Reindichte (Masse des darrtrockenen Holzes zu Volumen der reinen Zellwand, ohne Hohlräume). Die Reindichte beträgt für alle Holzarten einheitlich ca. 1500kg/m^3 .

Je höher die Rohdichte ist, umso höher ist der Zellwandanteil, der Porenanteil sinkt ab. So besteht Buche zu 44% aus Zellwandsubstanz, 56% aus Porenraum (Noack und Schwab (1986)).

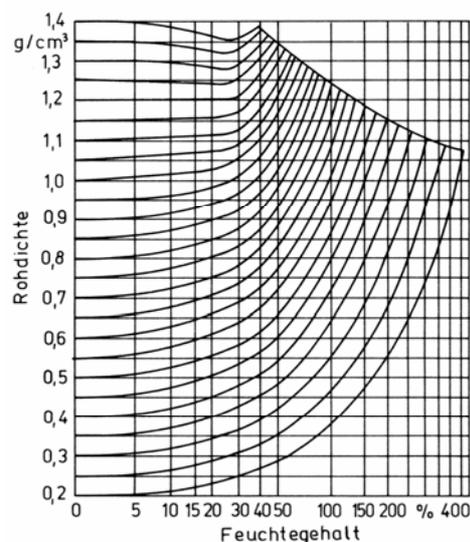


Abb.6: Einfluss der Holzfeuchte auf die Rohdichte (DIN 52182)

4. Thermische Eigenschaften

Wärmeleitfähigkeit/Wärmekapazität

Die Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK) ist die Wärmemenge, die durch einen Würfel mit 1 m Kantenlänge bei einer Temperaturdifferenz von 1 K in einer Stunde hindurchfließt. Die Wärmeleitfähigkeit steigt mit zunehmender Holzfeuchte (1% $\Delta u = 1,25\% \Delta \lambda$) und zunehmender Rohdichte. Sie beträgt bei Fichte, Kiefer und Tanne 0,13 W/(mK), bei Buche und Eiche 0,20 W/(mK). In Faserrichtung ist sie doppelt so hoch wie senkrecht dazu. Die spezifische Wärmekapazität (in kJ/(kgK)) eines Stoffes ist die Wärmemenge, die erforderlich ist, um 1 kg dieses Stoffes um 1 K zu erwärmen. Sie beträgt bei Holz im darrtrockenen Zustand etwa 1300 J/(kgK). Sie ist nahezu unabhängig von der Holzart, steigt aber mit zunehmender Holzfeuchte an (bei $u = 100\%$ auf 2800 J/(kgK)). Diese Kenngröße ist bei Holz und Holzwerkstoffen vergleichsweise hoch. Dies in Verbindung mit der geringen Wärmeleitfähigkeit bringt bei der Verwendung von Holzwerkstoffen zur Wärmedämmung (z.B. Faserdämmplatten) deutliche Vorteile im Vergleich zu Schaumstoffen oder Mineralwolle. Die effektiven Temperaturschwankungen sind also bei Dämmmaterialien auf Holzbasis geringer als z.B. bei mineralischen Dämmstoffen. Zudem tritt eine Phasenverschiebung der Temperaturmaxima auf.

Wärmeausdehnung

Die Wärmeausdehnung ist im Vergleich zur Ausdehnung durch Feuchteänderungen gering, kann aber z. B. bei Parkett (z.B. Fussbodenheizung) durchaus eine gewisse Bedeutung haben, da es sich in diesem Falle um recht große Flächen handelt. Sie beträgt bei Vollholz in Abhängigkeit von der Holzart und der Faserrichtung in Faserrichtung $3,15 - 4 \cdot 10^{-6}$ m/(mK), senkrecht zur Faserrichtung $16 - 40 \cdot 10^{-6}$ m/mK. Sie ist tangential etwas höher als radial.

Brandverhalten

Holz und Holzwerkstoffe sind brennbar (Baustoffklassen B). Der Zündpunkt (Temperatur bei der sich Holzgase bei Sauerstoffzufuhr selbst entzünden) liegt bei 330 bis 350°C, der Brennpunkt bei 260 bis 290°C. Holzstäube, wie sie bei der Holzverarbeitung auftreten, sind je nach Zusammensetzung des Staub- Luftgemisches hoch explosiv (Niemz 1993). Der Heizwert des Holzes liegt bei 15-17 MJ/kg, der von Braunkohlenbriketts bei 19-21 MJ/kg, er steigt mit der Rohdichte.

Einfluss der Temperatur auf die mechanischen Eigenschaften

Bei Erhöhung der Temperatur von Holz sinkt die Festigkeit (Niemz 1993). Nach Glos und Henrici (in Niemz 1993) reduzieren sich die Eigenschaften bei 100°C im Vergleich zu 20°C (vor der Klammer Bauholzabmessungen, in Klammer Daten für kleine Proben) auf folgende Werte:

- Biegefestigkeit 72 % (45%)
- Zugfestigkeit 92 % (89%)
- Druckfestigkeit 56 % (49 %)

Die geringe Wärmeleitung und Wärmeausdehnung des Holzes sowie die Ausbildung einer Holzkohleschicht am Rand erhöhen bei grossen Querschnittsabmessungen den Feuerwiderstand. Bei entsprechend grossen Querschnitten der tragenden Elemente verhalten sich daher Holzkonstruktionen günstiger als solche aus nichtbrennbaren Baustoffen wie Stahl. Dieser verliert bei den beim Brand auftretenden Temperaturen die Festigkeit und dehnt sich zudem aus. Es kommt zum Versagen (starkes Verformen und Einstürzen) der Konstruktion. Die Temperatur im Inneren grosser Holzquerschnitte (z.B. Brettschichtholz) erreicht dagegen maximal 100°C, die Festigkeitsreduzierung ist gering, die Tragfähigkeit bleibt erhalten.

5. Elektrische Eigenschaften

Darrtrockenes Holz ist ein guter Isolator. Der elektrische Widerstand steigt mit sinkender Holzfeuchte stark an (Abb. 7). So beträgt der spezifische Widerstand von Kiefer bei 0% Holzfeuchte $2,3 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$, bei 7% Holzfeuchte $5,0 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ und bei 20% $3,0 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$. Mit zunehmender Temperatur sinkt der Widerstand.

Die relative Dielektrizitätskonstante von Fichte beträgt bei 0% Holzfeuchte 1,7, bei 30% 3,5 und bei 80% 7,0.

Elektrische und dielektrische Eigenschaften des Holzes werden industriell genutzt für:

- Die Bestimmung der Holzfeuchte (elektrischer Widerstand, Dielektrizitätskonstanten)
- Die Verklebung von Holz (dabei wird die lokal in der Klebfuge erhöhte Feuchte genutzt. Beim Anlegen von Hochfrequenzenergie kommt es zur ständigen Umpolarisierung der Wassermoleküle und die dadurch entstehende Reibung führt zur lokalen Erwärmung)

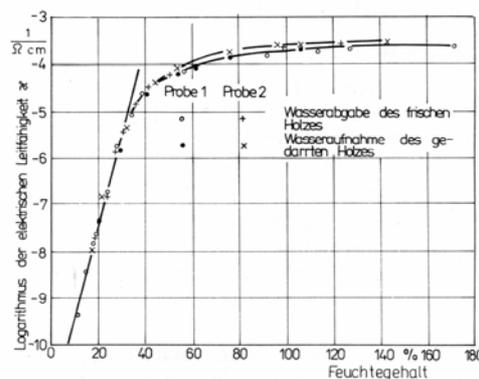


Abb. 7: Einfluss der Holzfeuchte und der Temperatur auf den elektrischen Widerstand von Redwood (nach Stamm, 1930, zitiert in Kollmann 1951)

6. Optische Eigenschaften

Die Farbe oder lokale Farbabweichungen werden häufig zur Qualitätskontrolle (z.B. bei Erkennung von Ästen mit Scannern) genutzt. Zur Charakterisierung der Farbe wird häufig z.B. das CIELab-System verwendet. Abb. 8 zeigt dieses System. Dabei werden die Komponenten Helligkeit (L), Rot-Grün- (a) und Gelb-Blau-Anteil (b) ermittelt. Zur Fehlererkennung wird bei Scannern häufig der sogenannte Tracheid-Effekt genutzt. Dabei wird ausgenutzt, dass sich ein auf die Oberfläche aufgebracht Laserstrahl bevorzugt entlang der Tracheiden ausbreitet. Wuchsunregelmässigkeit wie gesunde Äste, die durch Farbdifferenzen kaum sichtbar sind, werden so erkennbar gemacht. Holz verändert durch Lichteinwirkung seine Farbe deutlich. So ist das Nachdunkeln heller Hölzer bei Parkett oder Möbeln ein hinreichend bekannter Effekt.

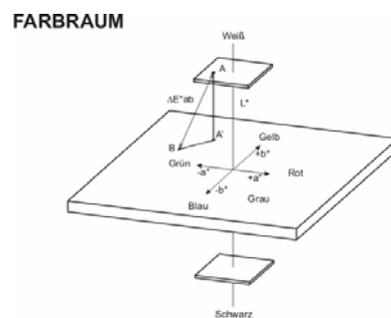


Abb. 8: Farbkennwerte nach dem CIELab System

7. Akustische Eigenschaften

Unter Schall verstehen wir mechanische Schwingungen eines elastischen Mediums. Schallwellen benötigen daher für Ihre Ausbreitung ein Trägermedium. Wir unterscheiden hörbaren Schall (Frequenz unter 20 kHz) und Ultraschall (Frequenz über 20 kHz). Schwingen die Teilchen in Ausbreitungsrichtung der Schallwelle sprechen wir von Longitudinalwellen, schwingen sie senkrecht dazu sprechen wir von Transversalwellen. Für Messungen an Holz und Holzwerkstoffe werden Gerätesysteme mit Frequenzen von einigen 100 Hz bis etwa 100 kHz eingesetzt. Bei höheren Frequenzen ist infolge der starken Absorption der Schallwellen nur eine Messung an sehr kleinen Proben möglich. Zwischen der Schallgeschwindigkeit c und den elastischen Eigenschaften des Holzes bestehen für Longitudinalwellen folgende Beziehungen für einen Stab:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Gl. (4)}$$

E- E-Modul,
Für *Transversalwellen* gilt:

$$c_{Trans} = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1}{2(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Gl. (5)}$$

Dabei bedeuten:

G- Schubmodul, ρ - Rohdichte, E- Elastizitätsmodul, μ - Poissonsche Konstante

Damit lassen sich E- und Schubmodul (G) über die Schallgeschwindigkeit bestimmen. Die nach dieser Methode bestimmten, sogenannten dynamischen E- und G-Moduli sind 10-20% höher als die im Normversuch mittels Universalprüfmaschine bestimmten. Schallwellen können zur zerstörungsfreien Prüfung in stehenden Bäumen und in verbaulichem Holz (z.B. Kontrolle von Dachstühlen) aber auch zur Festigkeitssortierung von Holz eingesetzt werden.

Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung in Holz

Alle Parameter, welche Dichte und E-Modul bzw. Schubmodul beeinflussen, gehen also wesentlich in die Schallgeschwindigkeit ein. Dies sind insbesondere:

- die Rohdichte
- die Faserlänge
- die Schnitttrichtung ($E_{l\ddot{a}ngs} > E_{radial} > E_{tangential}$)

Einen wesentlichen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit haben auch der Faser-Lastwinkel (längs/senkrecht zur Faser) sowie der Winkel zwischen radialer und tangentialer Richtung (radial ist die Schallgeschwindigkeit höher als tangential). Senkrecht zur Faserrichtung ist die Schallgeschwindigkeit mit 1000-1600m/s deutlich niedriger als parallel (4800-6000m/s, siehe auch Tabelle 3)

Je nach Holzart kommt es zu einer erheblichen Variation der Schallgeschwindigkeit. Tabelle 1 zeigt die Schallgeschwindigkeit verschiedener Holzarten.

Mit zunehmender Holzfeuchte sinkt die Schallgeschwindigkeit, ebenso bei Erhöhung der Temperatur. Relativ kleine Defekte wie Äste, Stauchbrüche oder lokaler Fäulebefall lassen sich bei Holz infolge der niedrigen Frequenzen und der damit grossen Wellenlängen (z.B. bei 50kHz und 6000m/s 12cm) kaum erfassen. Eine Übersicht zur Schallausbreitung in Holz ist in Niemz (2003) vorhanden.

Tabelle 3: Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung verschiedener Holzarten im Normal-klima (20°C/65% rel. Luftfeuchte)

| Holzart | Rohdichte (kg/m ³) | Schallgeschwindigkeit (m/s) |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Rotbuche | 780 | 5100 |
| Eiche | 710 | 4800 |
| Edelkastanie | 490 | 5000 |
| Fichte | 470 | 5900 |
| Tanne | 530 | 5600 |
| Kiefer | 490 | 5300 |
| Lärche | 620 | 5200 |

8. Alterung und Beständigkeit

Auf Holz wirken im praktischen Gebrauch zahlreiche Faktoren ein, die die Dauerhaftigkeit beeinflussen:

Dies sind:

- Das Klima
- Mechanische Vorbeanspruchung
- Wirkung aggressiver Medien

Allgemein gilt, dass Holz im trockenen Zustand unbegrenzt haltbar ist (kein Pilz- und Insektenbefall vorausgesetzt). Die Dauerhaftigkeit unter erhöhter Feuchteeinwirkung ist stark von der Holzart (insbesondere den Holzinhaltstoffen) abhängig. Mit verstärktem Pilzbefall ist etwa oberhalb von 20% Holzfeuchte zu rechnen (stark abhängig von Pilzart). Tabelle 4 zeigt eine Übersicht.

Durch klimatische Einwirkung (UV-Strahlen der Sonne, Klimawechsel, Niederschläge) kommt es zu Farbveränderungen in der Oberfläche und durch die Kombination von Befeuchtung (Regen) und Trocknung (Sonnenstrahlen) zur Rissbildung. Lignin wird durch die UV-Strahlung abgebaut und ausgewaschen, die Oberfläche vergraut. Das weichere Frühholz wird schneller ausgewaschen als das dichtere Spätholz. Zusätzlich führen Schimmelpilze (Bläue- bzw. Vergrauungspilze) zu Farbveränderungen, die Oberfläche färbt sich grau bis schwarz (Sell, Fischer, Wigger (2001)). Risse treten bei Überschreiten der Querszugfestigkeit oder der Bruchdehnung auf. Die Risse sind in Tangentialrichtung stärker ausgeprägt und länger als in Radialrichtung. Für die Wiederverwendung von gebrauchtem Holz werden teilweise Abminderungen hinsichtlich der Tragfähigkeit vorgenommen (Niemz (1993)).

Gegenüber Chemikalien ist Holz relativ beständig, daher wird es z.B. gern als Dachbinder in Düngemittellagern verwendet. Beim Kontakt mit Metall kommt es je nach Holzart teilweise durch vorhandene Inhaltstoffe zu starken Verfärbungen (z.B. bei der Eiche Schwarzfärbung durch die Gerbsäure).

Tabelle 4: Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten

| Holzart | Resistenzklasse gegen Pilze |
|-----------|-----------------------------|
| Buche | 5 |
| Fichte | 4 |
| Tanne | 4 |
| Lärche | 3-4 |
| Kiefer | 3-4 |
| Douglasie | 3-4 |
| Eiche | 2 |
| Robinie | 1-2 |

1- sehr dauerhaft (länger als 25 Jahre); 2- dauerhaft (15-25 Jahre); 3- mässig dauerhaft (10-15 Jahre); 4- wenig dauerhaft (5-10 Jahre), 5- nicht dauerhaft (weniger als 5 Jahre)

9 Elastomechanische und rheologische Eigenschaften

9.1 Übersicht zu wichtigen Einflussgrössen

Die elastomechanischen und rheologischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen werden unterteilt in:

- Das elastische Verhalten charakterisierende Kenngrössen (E - Modul, Schubmodul, Poissonsche Konstanten)
- Festigkeitseigenschaften

Infolge des viskoelastischen Verhaltens von Holz sind alle Eigenschaften zudem zeitabhängig (elastische Konstanten und Festigkeitseigenschaften), es gilt also:

$$E, G = f(t); \sigma = f(t)$$

für E- Elastizitätsmodul, G- Schubmodul, σ - Festigkeitseigenschaften.

Stark vereinfacht kann Holz als orthotropes System mit den 3 Hauptachsen längs, radial und tangential betrachtet werden (Abb. 9). Dabei wird die Neigung zwischen den Jahrringen meist nicht berücksichtigt.

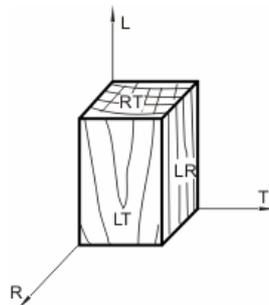


Abb. 9: Hauptachsen des Holzes und deren Zuordnung

L- Longitudinal (1), R- Radial (2), T- Tangential (3)

LT- Tangentialfläche, Fladerschnitt; RT-Querschnitt, Hirnfläche; LR- Radialfläche, Riftschnitt

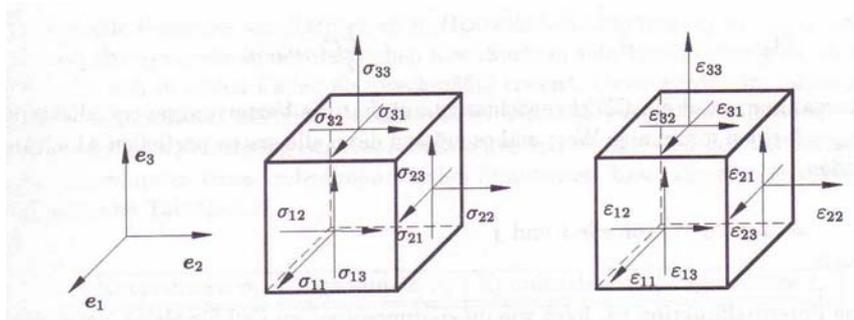
Nachfolgend werden die allgemeinen Grundlagen der Bestimmung der elastischen und der Festigkeitseigenschaften gegeben. In den Anlagen ist eine Übersicht zu den wesentlichen geltenden Normen enthalten.

9.2 Elastizitätsgesetz und Spannungs-Dehnungsdiagramm

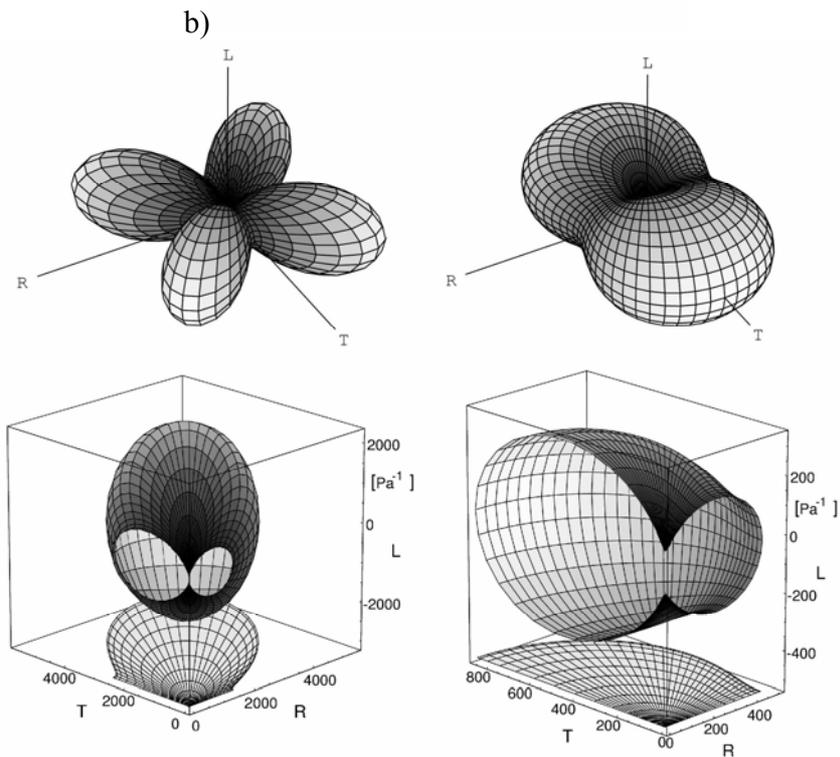
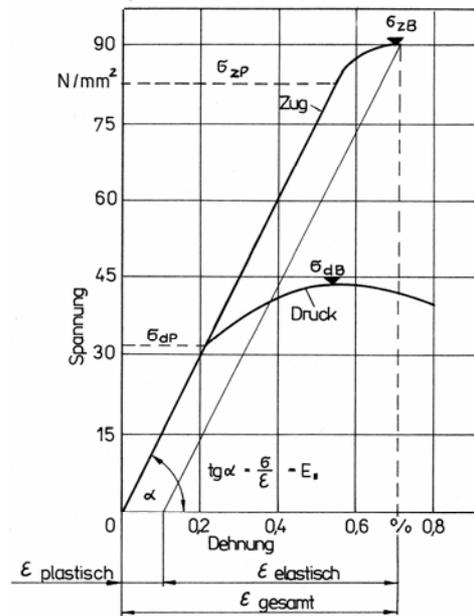
9.2.1 Grundlagen

Die Elastizität ist die Eigenschaft fester Körper, einer durch äussere Kräfte bewirkten Verformung entgegen zu wirken. Ausgangspunkt für die Verallgemeinerung des Hooke'schen Gesetzes auf den dreidimensionalen Spannungs- und Verzerrungszustand sind die in Abb. 10a dargestellten positiven Spannungen und Verzerrungen in einem Körper, dessen Kanten parallel zum Bezugssystem liegen. Gleiche Indizes führen zu Normalspannungen, ungleiche zu Schubspannungen. Der Spannungs- und der Verzerrungstensor werden als symmetrische Tensoren vorausgesetzt, d.h. es gilt $\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$ und $\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ji}$. Von den 6 Schubspannungen sind also nur 3 voneinander unabhängig.

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). Abb. 3.10b zeigt das Spannungs-Dehnungsdiagramm.



a)



c)

Abb. 10: Elastizitätsgesetz

a) Spannungen und Verzerrungen

b) Spannungs-Dehnungsdiagramm von Vollholz (einachsige Belastung)

c) Deformationskörper für Zugbelastung von Fichte (links) und Buche (rechts) nach Grimsel (1999)

Abb. 3.10c zeigt einen von Grimsel (1999) unter Nutzung der elastischen Konstanten berechneten dreidimensionalen Deformationskörper für Fichte und Buche bei Zugbelastung. Während sich Buche in tangentialer Richtung am stärksten verformt, tritt bei Fichte die grösste Deformation unter einem Winkel von 45° zu den Hauptachsen auf, was auf den geringen Schubmodul G_{RT} der Fichte zurückzuführen ist. Zwischen Laub- und Nadelholz bestehen bezüglich der Deformation grosse Unterschiede. Es kann eine Klassifizierung in Laub- und Nadelhölzer vorgenommen werden. Dies spiegelt sich auch in den in 9.2.2 aufgeführten Verhältniszahlen der elastischen Konstanten wieder.

Für die Dehnung gilt bei Normalspannungen gilt:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (G. 6)$$

ε - Dehnung
 Δl - Längenänderung
 l - Anfangslänge

Innerhalb des elastischen Bereiches gilt (Hookesches Gesetz):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (Gl. 7-1)$$

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (Gl. 7-2)$$

σ - Spannung (N/mm²)
 ε - Dehnung (%)
 γ - Gleitung
 E - Elastizitätsmodul (N/mm²)
 G - Schubmodul (N/mm²)
 τ

Streng genommen gilt nach der Theorie der orthotropen Elastizität das verallgemeinerte Hookesche Gesetz. Abb. 9 zeigt die Koordinatenachsen.

Für einen orthotropen Körper wie Holz mit extremer Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften entlang 3 Hauptachsen gilt unter Verwendung der Nachgiebigkeitsmatrix [S]:

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (Gl. 8-1)$$

oder allgemein $\varepsilon = S \cdot \sigma$

(Gl. 8-2)

Prinzipiell ist auch die Darstellung als Elastizitätsmatrix [C] in analoger Form möglich.

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \quad (\text{Gl. 8-3})$$

Es gilt: $C=S^{-1}$ und $S=C^{-1}$

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – Dehnungen (Körper ändert Abmessungen, d.h. Volumen aber nicht die Gestalt) $\gamma_{23} \gamma_{13} \gamma_{12}$ – Gleitungen (Körper ändert Gestalt, aber nicht Volumen);

$\bar{\sigma}$ – Normalspannungen, τ – Schubspannungen

In der Matrix sind:

S_{ii} für $i = 1, 2, 3$ = Dehnungszahlen

S_{ii} für $i = 4, 5, 6$ = Gleitzahlen

S_{ik} für $i, k = 1, 2, 3$ = Querdehnungszahlen; $i \neq k$

Dabei gilt:

Für die E-Moduli:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}, \quad E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2}, \quad E_3 = \frac{\sigma_3}{\varepsilon_3}$$

Für die G-Moduli:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}}, \quad G_{13} = \frac{\tau_{13}}{\gamma_{13}}, \quad G_{23} = \frac{\tau_{23}}{\gamma_{23}}$$

Für die Dehnungszahlen:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad S_{33} = \frac{1}{E_3}$$

$$S_{44} = \frac{1}{G_{23}}, \quad S_{55} = \frac{1}{G_{13}}, \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

$$S_{12} = \frac{-\mu_{21}}{E_2}, \quad S_{13} = \frac{-\mu_{31}}{E_3}, \quad S_{23} = \frac{-\mu_{32}}{E_3},$$

$$S_{21} = \frac{-\mu_{12}}{E_1}, \quad S_{31} = \frac{-\mu_{13}}{E_1}, \quad S_{32} = \frac{-\mu_{23}}{E_2}$$

μ – Poissonsche Konstante

G- Schubmodul

Es gibt also 3 E-Moduli, 3 Schubmoduli

und 6 Poissonsche Konstanten (davon sind 3 voneinander unabhängig).

Für die Poissonschen Konstanten von Vollholz gilt:

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

Bei praktischen Messungen kommen meist gewisse Abweichungen von der Symmetrie vor, so dass bei Berechnungen meist der Mittelwert verwendet wird, um die dafür notwendigen Symmetriebedingungen einzuhalten (siehe auch Bodig und Jayne (1993)). Der 1. Index gibt die Richtung der Last, der zweite der Dehnung an. In der Fachliteratur wird hierbei häufig auch eine umgekehrte Bezeichnung verwendet. Die hier verwendete Bezeichnung lehnt sich an Bodig und Jayne sowie die in der Festkörpermechanik übliche an (z.B. Altenbach, H.; Altenbach, J.; Rickards, R.(1996)). Die Verzerrungs-Spannungsbeziehungen können durch die Ingenieurkonstanten ersetzt werden. Im Verzerrungs-Spannungszustand lassen sich die Ingenieurkonstanten wie folgt zusammenfassen.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (Gl. 8-3)$$

γ - Normalspannungen

τ - Schubspannungen

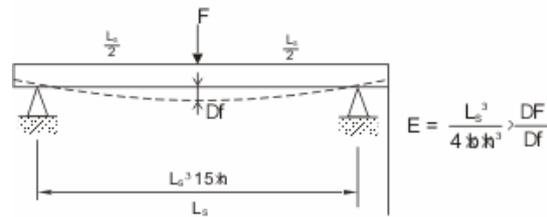
Kenngrößen und deren Bestimmung

Die meist genutzten Kenngrößen sind der Elastizitäts- und der Schubmodul.

E-Modul

Der Elastizitätsmodul wird bei Normalspannungen (Zug, Druck) aus der Gleichung 8-1 (Abb. 9) nach dem Hookeschen Gesetz bestimmt. Die Kraft muss dabei unterhalb der Proportionalitätsgrenze liegen. Meist wird er durch Biegebelastung (Drei- oder Vierpunkt) ermittelt (Abb. 11). Bei Dreipunktbelastung ist der bestimmte E-Modul vom Verhältnis Stützweite zu Dicke abhängig. Er steigt mit zunehmendem Verhältnis Stützweite zu Dicke auf etwa 15 - 20 an. Bei geringerem Verhältnis treten starke Schubverformungen auf. Der gemessene E-Modul ist dadurch geringer als der bei reiner Biegung bestimmte.

Dreipunktbelastung



Vierpunktbelastung

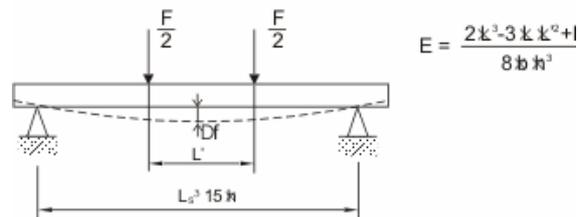


Abb. 11: Bestimmung des E-Moduls bei Biegebelastung

Schubmodul

Wirkt ein Kräftepaar analog Abb. 12, treten Schubspannungen auf. Schubspannungen sind auch bei Biegung vorhanden, wenn Querkräfte auftreten (z.B. bei Dreipunktbelastung, Flächenlast).

Schubspannungen können insbesondere bei sandwichartig aufgebauten Werkstoffen (im Vergleich zur Deckschicht wesentlich schubweichere Mittellagen) zum Schubbruch führen. Auch bei Brettschichtholz kann es zum sogenannten Rollschub kommen (Abgleiten der Jahrringe an der Grenze Früh-Spätholz). Sehr typisch ist ein Versagen durch Rollschub bei Sperrholz und bei Brettschichtholz in den in RT-Richtung beanspruchten Mittellagen.

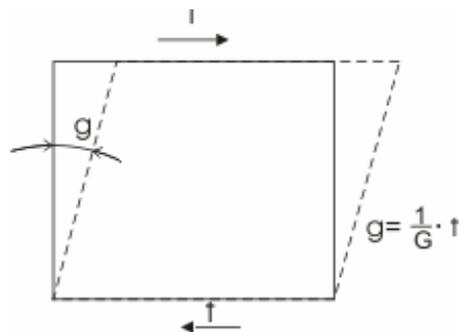


Abb. 12: Bestimmung des Schubmoduls

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:

$$\frac{\Delta b}{b} = -\mu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Gl. 9})$$

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

also z.B.

$$\mu_{LT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$$

μ - Poissonsche Konstante (-)

ε - Dehnung (%)

l - Länge der Probe, Δl - Längenänderung

b -Breite der Probe, Δb – Breitenänderung

Durch FEM Simulationsrechnungen stellte Grimsel (1999) fest, dass eine Holzprobe bei einachsiger Zugbelastung unter bestimmten Bedingungen gleichzeitig länger und dicker werden kann. Es können als bei bestimmter Jahrringlage durchaus auch positive Querdehnungen auftreten. Experimentelle Erfahrungen zeigen, dass bei der Bestimmung der Poissonschen Konstanten an Holz erhebliche Probleme auftreten. Zudem wird diese ebenso wie fast alle anderen Eigenschaften durch die Holzfeuchte beeinflusst. Arbeiten dazu führte Neuhaus (1981) durch.

Es gibt 6 Poissonsche Konstanten. Der 1. Index gibt bei der hier verwendeten Schreibweise die Richtung der Kraft (Längsdehnung), der zweite die Richtung der Querdehnung an.

9.2.2 Einflussfaktoren

Elastische und Festigkeitseigenschaften unterscheiden sich in den 3 Hauptschnitttrichtungen deutlich. Noack und Schwab (in von Halász und Scheer (1986)) geben folgende Grössenverhältnisse an:

| | | | | | |
|--------------------------------|-------|---|-------|---|-------|
| Elastizitäts-Modul (E): | E_T | : | E_R | : | E_L |
| • bei Nadelholz: | 1 | : | 1,7 | : | 20 |
| • bei Laubholz: | 1 | : | 1,7 | : | 13 |

Schub- Modul (G):

G_{LR} (Schub der Radialfläche): G_{LT} (Schub der Tangentialfläche)

- bei Nadelholz: 1 : 1
- bei Laubholz: 1,3 : 1

G_{RT} (Schubmodul der Hirnfläche)

- bei Nadelholz: 10 % von G_{LT} (auf Grund durchgehender Frühholzzone)
- bei Laubholz: 40 % von G_{LT}

Querkontraktion:

Die Querkontraktion in tangentialer Richtung beträgt das 1,5-fache der Querkontraktion in Radialrichtung. Sie ist in Faserrichtung am geringsten.

Tabelle 3 und 4 der Anlage 2 zeigen ausgewählte Kennwerte der Poissonschen Konstanten.

9.3 Rheologische Eigenschaften

Holz ist viskoelastisch, d.h. alle seine Eigenschaften sind zeitabhängig. Es wird unterschieden zwischen:

- Kriechen
- Spannungsrelaxation und
- Dauerstandfestigkeit.

Kriechen

Wird eine Probe durch eine konstante Last beansprucht, so nimmt das Ausmass der Formänderung mit der Zeit zu. Dabei treten folgende Phasen auf:

- Primärkriechen
- Sekundärkriechen
- Tertiärkriechen.

In der Primärphase steigt die Kriechverformung zunächst stetig an. 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 (Abb. 13).

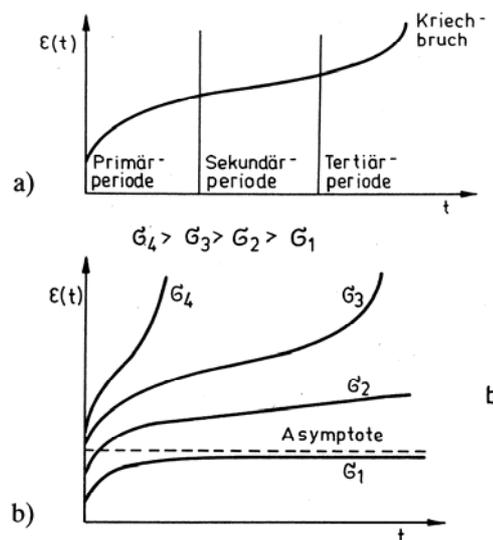


Abb. 13: Phasen der Kriechverformung

Als Kenngrösse für die Kriechverformung wird meist die dimensionslose Kriechzahl verwendet. Dabei gilt:

$$\varphi = \frac{f_t - f_0}{f_0} \quad (Gl. 10)$$

ϕ - Kriechzahl

f_t - zeitabhängige Durchbiegung

f_0 -elastische Durchbiegung

Senkrecht zur Faserrichtung wird etwa die 8-fache Kriechzahl erreicht wie parallel zur Faserrichtung (Niemz (1993)). Folgende Rangordnung ergibt bezüglich der Grösse der Kriechverformung (von oben nach unten zunehmend):

- Vollholz
- Schichtholz, LVL, Parallam
- Sperrholz, Massivholzplatte
- OSB
- Spanplatte
- MDF, HDF, harte Faserplatte (Nassverfahren)

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

Mit zunehmender Holzfeuchte steigt die Kriechverformung im Konstantklima deutlich an. Im Wechselklima (wechselnde relative Luftfeuchtigkeit) kommt es zur Überlagerung des Quellverhaltens (und daraus resultierender innerer Spannungen) und des durch die (äussere) Belastung bewirkten Kriechens. Dieser Effekt wird auch als mechanosorptives Kriechen bezeichnet. Dadurch kann die Kriechverformung z.B. bei Vollholz bei **Biegebelastung** in der Trocknungsphase (Kriechen und Schwinden des Holzes) steigen und in der Durchfeuchtungsphase (Kriechen und Quellen) sinken.

Dieser Effekt bei Biegebelastung wird als Kriechphänomen bezeichnet. Bei Spanplatten und MDF tritt er nicht auf. Der Effekt wird deutlich durch die Dauer der Klimaeinwirkung, den Probenquerschnitt und die Höhe der Last beeinflusst (Hanhijärvi 1995).

Eine Erhöhung der Last bewirkt einen Anstieg der Kriechverformung. Eine zusammenfassende Darstellung enthalten Gressel (1971) und Niemz (1993).

Tabelle 3.7 zeigt orientierende Richtwerte für die Kriechverformung nach 140 Tagen Belastung. Die Kriechzahl von Vollholz liegt im Normalklima in Faserrichtung bei 0,1-0,3 senkrecht zur Faserrichtung bei 0,8 -1,6.

Durch Oberflächenbeschichtung und die damit einhergehende Reduzierung der Feuchteaufnahme kann das Kriechverhalten vermindert werden.

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.

Abb. 14 zeigt die Spannungsrelaxation bei Druckbelastung im Wechselklima. In der Trocknungsphase sinkt die Spannung (hervorgerufen durch das Schwinden), in der Befeuchtungsphase steigt sie. Mit steigender Zyklenanzahl sinkt die Spannung deutlich ab. Zwischen Konstant- und Wechselklima bestehen deutliche Unterschiede. Die Spannung reduziert sich bei vorgespanntem Brettschichtholz nach 70 Tagen wie folgt (Popper, Gehri und Eberle 1999):

- im Normalklima bei 65% relativer Luftfeuchte um 10 %,
- im Klima bei 88 % r.L. um 48%
- bei Befeuchtung von 65% auf 88% r.L. um 25 %

- bei Trocknung von 88% auf 65% r.L. um 60%

Die Verbindungen müssen also kontrolliert nachgespannt werden; häufig werden die Vorspannelemente eingeklebt (Popper, Gehri und Eberle 1998). Dabei zeigte sich, dass z.B. beim Einleimen von Buchenholz mit $0,5 \text{ N/mm}^2$ Vorspannung in Brettschichtholz mindestens ein Bewehrungsfaktor von 0,4% (Volumen des eingeklebten Vorspannelementes zum Volumen des zu bewehrenden Holzes ohne Bohrung) erforderlich ist. Die durch die Armierung erreichbare Dimensionsstabilisierung betrug etwa 83%.

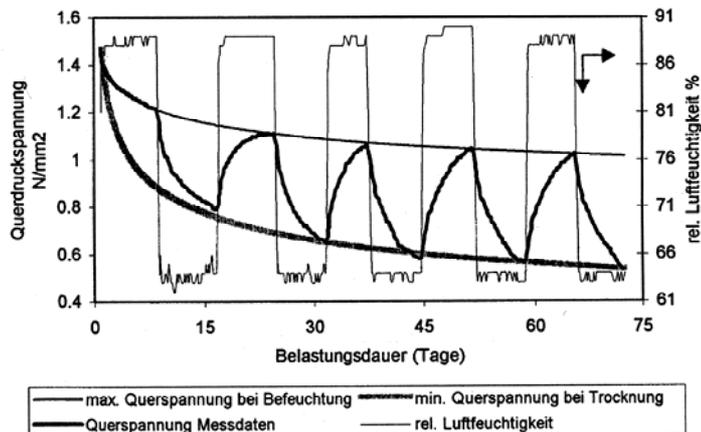


Abb. 14: Spannungs- und Feuchteverlauf in vorgespanntem Brettschichtholz (Spannungsrelaxation) nach Popper, Gehri und Eberle (1999)

Der Betrag der Spannungsrelaxation liegt etwa in Höhe der Kriechverformung.

Dauerstandfestigkeit

Die Dauerstandfestigkeit ist die Spannung, mit der ein Werkstoff bei unendlich langer statischer Belastung 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.

Rheologische Modelle

Zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens werden oft rheologische Ersatzmodelle verwendet. Diese bestehen aus elastischen (Federn) und viskosen Elementen (zähes Fliesen in einem Dämpfer), die in verschiedenen Kombinationen zusammengeschaltet werden. Häufig wird das Burgers-Modell verwendet.

9.4 Festigkeitseigenschaften

Die Festigkeit ist die Grenzspannung, bei welcher ein Prüfkörper unter Belastung bricht. Es wird nach der Geschwindigkeit des Lasteintrages unterschieden zwischen

- statischer Festigkeit (langsamer Kraftanstieg bis zum Bruch) und
- dynamischer Festigkeit (schlagartige Krafteinwirkung oder wechselnde Belastung).

Nach der Krafeinleitung wird ferner unterteilt in

- Zugfestigkeit
- Druckfestigkeit
- Biegefestigkeit
- Scherfestigkeit
- Spaltfestigkeit
- Torsionsfestigkeit
- Haltevermögen von Verbindungsmitteln (Schrauben, Nägel, etc.).

Da Holz eine erhebliche Streuung der Eigenschaften aufweist, wird in der Praxis mit Sicherheitszugaben gearbeitet. Im Bauwesen wird meist die sogenannte 5 % Fraktile (oder charakteristischer Wert) verwendet (siehe z.B. Dunky und Niemz (2002)). Unter Voraussetzung einer Normalverteilung berechnen sich diese folgendermassen:

- unteres 5%-Quantil:

$$L^q_{5\%} = x - s \cdot t \quad (Gl.11-1)$$

- oberes 5%-Quantil:

$$U^q_{5\%} = x + s \cdot t \quad (Gl.11-2)$$

s Standardabweichung

t Wert der t- Verteilung (DIN EN 326-1), dabei muss die Anzahl der Messwerte, die Irrtumswahrscheinlichkeit (im allgemeinen 5%) und die Aussagewahrscheinlichkeit (im allgemeinen 95%) berücksichtigt werden.

x ...

Meist erfolgt eine einaxiale Belastung. Arbeiten zu biaxialer Belastung führte Eberhardsteiner (2002) durch. Das Verformungs- und auch das Bruchverhalten werden auf verschiedenen Strukturebenen (Brett, Normproben, Früh- und Spätholz, Zellwandschichten, Holzfasern) intensiv untersucht und zumindest das elastische Verhalten auch modelliert. (z.B. Persson (2000)).

Anlage 2 enthält ausgewählte mechanische Kennwerte von Holz.

9.4.1 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit berechnet sich nach Gl. 12 zu:

$$\sigma_{zB} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (Gl.12)$$

F_{\max} - Bruchkraft

A- Querschnittsfläche der Probe (Länge · Breite)

σ_{zB} - Zugfestigkeit in N/mm²

Die Zugfestigkeit wird an kleinen, fehlerfreien Proben nach DIN 52188, an Bauholz nach EN 408 bestimmt. Die Zugfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung liegt bei lediglich 5-10% der Zugfestigkeit in Faserrichtung. Querszugbeanspruchung ist daher im Holzbau mög-

lichst zu vermeiden. Gewisse Unterschiede bestehen auch zwischen radialer und tangentialer Richtung. In radialer Richtung macht sich teilweise eine verstärkende Wirkung der Holzstrahlen bemerkbar (siehe Burgert (2000)).

9.4.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit (σ_{dB}) berechnet sich analog Gl. 12. 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 (vgl. auch Abb. 10). Die Druckfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung ist sehr gering. 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.

9.4.3 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit berechnet sich nach Gl. 13 zu:

$$\sigma_{bB} = \frac{M_b}{W_b} \quad (\text{Gl. 13-1})$$

für einen rechteckigen Querschnitt und eine Dreipunktbiegung gilt:

$$\sigma_{bB} = \frac{3F_{\max} \cdot l_s}{b \cdot h^2} \quad (\text{Gl. 13-2})$$

M_b -Biegemoment

W_b -Widerstandsmoment

σ_{bB} - Biegefestigkeit in N/mm²

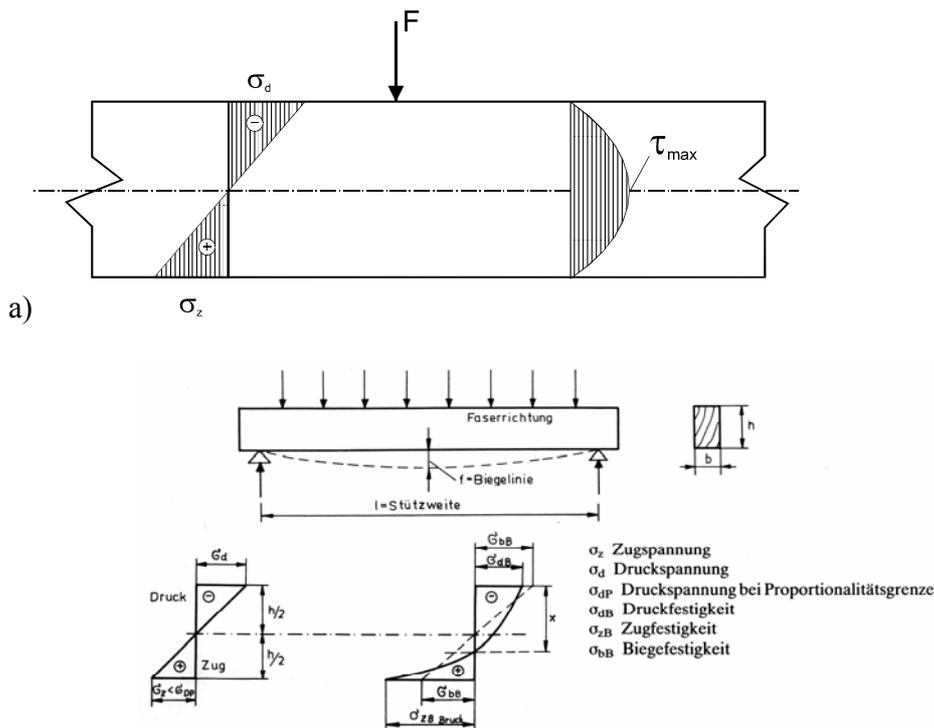
F_{\max} -Bruchkraft

l_s - Stützweite

b - Probenbreite

h - Probenhöhe

Die gebräuchlichsten Belastungsfälle sind der Dreipunkt-Versuch (Träger auf 2 Stützen mit mittiger Einzellast) und der Vierpunkt-Versuch (Träger auf 2 Stützen und Krafteinleitung über 2 Kräfte). Bei Biegung treten Zug- und Druckspannungen in den Randzonen auf. Je nach Belastungsfall sind bei Einwirkung von Querkräften (z.B. bei Dreipunktbiegung) Schubspannungen vorhanden, die in der neutralen Faser das Maximum erreichen. (Abb. 15).



b)
 Abb. 15: Spannungsverteilung bei Biegebelastung
 a) Normal- und Schubspannungen bei Dreipunktbiegung
 b) Verschiebung der Spannungsnulllinie bei Vollholz

Bei der Vierpunktbelastung ist der mittlere Bereich zwischen den beiden Kräften schubspannungsfrei. Schubspannungen treten dort nur in den Randbereichen zwischen den Auflagern und dem Kräfteintrag 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 (Abb. 15b), bei Holzpartikelwerkstoffen ist dies nicht der Fall, da Zug- und Druckfestigkeit etwa in gleicher Größenordnung liegen (Niemz (1993)).

Teilweise wird auch die Brucharbeit beim statischen Kurzzeitversuch zur Charakterisierung des Bruchverhaltens verwendet. Dabei wird die Fläche bis zur maximalen Bruchkraft im Spannungs-Dehnungsdiagramm ermittelt (Angabe in kJ). In amerikanischer Literatur wird teilweise auch die Brucharbeit in kJ/m^3 (bezogen auf das Probenvolumen zwischen den Auflagern) angegeben.

$$W_u = \frac{W_{F \max}}{V} \quad (\text{Gl. 14})$$

Die Brucharbeit sagt etwas zur Zähigkeit des Materials aus.

W_u - Arbeit bis zur Maximalkraft beim Bruch in kJ/m^3 (Flächenintegral)

$W_{F_{\max}}$ - Arbeit bis F_{\max} in kJ

V- Volumen der Probe im Bereich zwischen den Auflagern ($l \cdot b \cdot h$)

Eine hohe Brucharbeit ist für einen eher zähen Bruch charakteristisch (z.B. für Eibe typisch).

9.4.4 Scher- und Spaltfestigkeit

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 nach Gl. 14 zu:

$$\sigma_{\text{scher}} = \frac{F_{\max}}{a \cdot b} \quad (\text{Gl. 15})$$

σ_{scher} -Scherfestigkeit in N/mm²

F_{\max} - Bruchlast

a, b -Querschnittsabmessungen

Tabelle 2 in Anlage 2 zeigt die Scherebenen. Die Scherfestigkeit bei Belastung parallel zur Faserrichtung (Scherfläche LR oder LT) ist grösser als diejenige senkrecht zur Faserrichtung (Scherfläche LR oder LT). Bei Belastung senkrecht zur Faser kommt es zu einer starken Zusammendrückung des Holzes, da die Querdruckfestigkeit gering ist. Beim Scheren in der Hirnfläche (RT) kommt es zunächst zu einer starken Verdichtung des Holzes, erst danach zum Scheren, wobei beim Bruch eine starke Strukturauflösung stattfindet. Ein eigentlicher Scherbruch wird in dieser Scherebene kaum erreicht. Es wird dabei letztlich die Scherfestigkeit des verdichteten Holzes geprüft.

Spaltfestigkeit/Spaltbarkeit

Holz ist in Radialrichtung gut spaltbar, tangential deutlich schlechter, senkrecht zur Faserrichtung nicht. In der Spaltbarkeit bestehen erhebliche Unterschiede zwischen den Holzarten. Sehr gut spaltbar sind Fichte, Pappel, Douglasie, schwer spaltbar sind Eiche, Esche und Obsthölzer. Es ist ein deutlicher Einfluss der Dichte und des Faserverlaufs vorhanden. Mit zunehmender Dichte verschlechtert sich die Spaltbarkeit. Geradfasrige Hölzer lassen sich gut, solche mit Wechseldrehwuchs schlecht spalten.

9.4.4.5 Auszieh Widerstand von Nägeln und Schrauben

Der Schrauben- bzw. Nagelauszieh Widerstand ist die Kraft, die zum Herausziehen einer Schraube oder eines Nagels aus dem Holz unter definierten Bedingungen (Vorbohren, Einschraub- oder Einschlagtiefe) erforderlich ist. Wichtigste Einflussgrösse ist die Rohdichte.

9.4.5 Härte

Die Härte ist der Widerstand, den Holz dem Eindringen eines härteren Materials entgegensetzt. Die Härte ist insbesondere bei Parkett von grosser Bedeutung. Die am häufigsten benutzte Methode ist die Prüfung nach Brinell. Dabei wird eine Stahlkugel (z.B. 2,5 oder 10mm Durchmesser) mit einer materialabhängigen, konstanten Kraft belastet und der Durchmesser des Kugeleindrucks nach Entlastung bestimmt. Die Härte steigt mit zunehmender Dichte des Holzes linear an (Schwab 1990, siehe auch Tabelle 4). Das Messergebnis ist aber auch abhängig von der Höhe der Belastung bei der Prüfung. Die Prüflast wird daher stets mit vermerkt. Moderne Messverfahren erlauben es, durch Messung der Kraft und der Eindringtiefe die Brinellhärte zu berechnen (Stübi und Niemz 2000).

Die Härte berechnet sich wie folgt:

- unter Verwendung des Durchmessers des Eindruckes

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (Gl. 16)$$

- unter Verwendung der Eindringtiefe

$$HB = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h} \quad (Gl. 17)$$

HB- Härte nach Brinell (N/mm²)

F- Kraft (N)

D- Kugeldurchmesser (mm)

d- Kalottendurchmesser (mm)

h- Eindringtiefe (mm)

Tabelle.4: Brinellhärte verschiedener Holzarten nach Sell (1997)

| Holzart | Rohdichte in g/cm ³ bei u = 12% | Brinellhärte auf Hirnfläche in N/mm ² | Brinellhärte auf Sei- tenfläche in N/mm ² |
|-----------|---|--|---|
| Balsa | 0,10...0,23 | 4...7 | 2...3 |
| Buchsbaum | 0,90...1,03 | 112 | 58 |
| Fichte | 0,43...0,47 | 31 | 12...16 |
| Kiefer | 0,51...0,55 | 39...41 | 14...23 |
| Lärche | 0,54...0,62 | 47...52 | 19...25 |

9.4.6 Sonstige Eigenschaften

Schlagzähigkeit

Die Schlagzähigkeit des Holzes ist der Widerstand gegenüber einer z.B. mittels Pendelschlagwerk (Labormaßstab) erzeugten schlagartigen Belastung. Gemessen wird die Bruchschlagarbeit in kJ/m². Insbesondere Pilzbefall wirkt sich stark negativ auf die Bruchschlagarbeit aus.

Wechselfestigkeit

Darunter wird bei einer dynamischen Belastung (z.B. wechselnde Zug- und Druckbelastung analog dem Wöhler-Diagramm) die Spannung verstanden, der das Holz bei definierter Beanspruchungsdauer ausgesetzt werden kann, ohne zu brechen. Sie wird als prozentualer Anteil der Kurzzeitfestigkeit angegeben.

Reibungsbeiwerte

Unter dem Reibungsbeiwert μ versteht man das Verhältnis von Reibkraft F_R zu Normalkraft F_N . Wir unterscheiden zwischen Haft- und Gleitreibung. Die Gleitreibung ist geringer als die Haftreibung. Der Haftreibungsbeiwert von Fichte parallel zur Faser liegt bei 0,6 bis 0,8; der Gleitreibungsbeiwert bei 0,4 bis 0,5.

Bruchzähigkeit (K_{IC})/ Bruchenergie

Im Rahmen der Einführung neuer Berechnungsmethoden für die Dimensionierung von Holzkonstruktionen gewinnt die Bruchzähigkeit auch in der Holzforschung zunehmend an Bedeutung. Wir unterscheiden 3 verschiedene Moden (Mode I: Normalspannungen (symmetrisches Öffnen des Risses (Spalten), Mode II: Längsschubriss, Mode III: Querschubriss).

Gegenstand der Bruchmechanik ist die Entwicklung analytischer Modelle des Bruchvorganges sowie von Kenngrößen und Prüfmethoden zur bruchsicheren Gestaltung von Werkstoffen und Bauteilen. Unter der Bruchzähigkeit versteht man den kritischen Spannungsintensitätsfaktor K_{IC} , bei dem Gewaltbruch eintritt. Der Wert von K_{IC} gibt Aufschluss darüber, welchen Widerstand ein Material der Ausbreitung eines Risses entgegensetzt. Neben der Bruchzähigkeit wird häufig die Bruchenergie geprüft.

$$K = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot Y$$
$$K = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (Gl. 18)$$

K- Spannungsintensität (MPa $\cdot \sqrt{m}$)

σ - Spannung (MPa)

a- Risslänge (mm)

P- Kraft (N)

B- Dicke (mm)

W- Probenweite (mm)

Y- Geometriefaktor ($Y = f(a/W)$)

Für Fichte liegt der Wert für K_{IC} in der RL Ebene bei 0,27-0,42, in der TL Ebene bei 0,25-0,42 MPa $\cdot \sqrt{m}$.

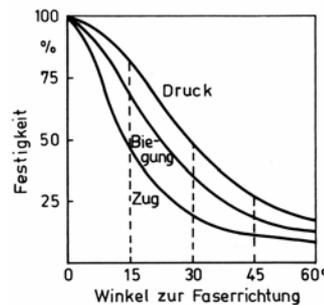
Häufig wird auch die in vielen Fällen aussagefähigere Bruchenergie verwendet.

9.4.7 Wichtige Einflussfaktoren auf die Festigkeitseigenschaften

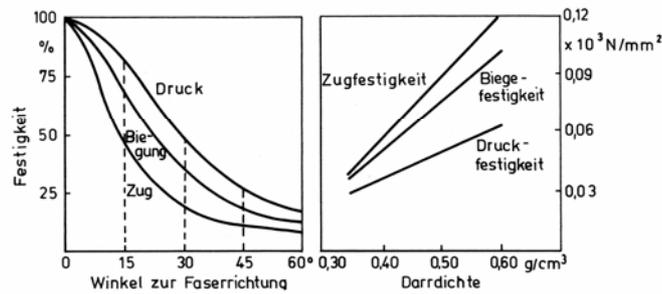
Die Festigkeit in Faserrichtung ist deutlich höher als senkrecht zur Faserrichtung. Sie ist radial höher als tangential. Mit zunehmendem Winkel zwischen Probenlängsachse und Faserrichtung (Faser-Last-Winkel) sinken die elastischen Konstanten und die Festigkeit deutlich ab. Der Einfluss des Faser-Last-Winkels kann nach dem Gesetz von Hankinson beschrieben werden (siehe Niemz (1993)). Abb. 16 zeigt wichtige Einflussfaktoren auf die Festigkeit von Holz.

Der Winkel zwischen radialer und tangentialer Richtung wird auch als Jahrringneigung bezeichnet und ist z.B. bei Schubbelastung in der RT-Ebene von Bedeutung. Abb. 16 zeigt exemplarisch den Einfluss der Jahrringneigung auf die Schallgeschwindigkeit. Diese Abhängigkeit gilt z.B. auch für den Schubmodul. Die Zugfestigkeit in Faserrichtung ist bei kleinen, fehlerfreien Proben etwa doppelt so hoch wie die Druckfestigkeit.

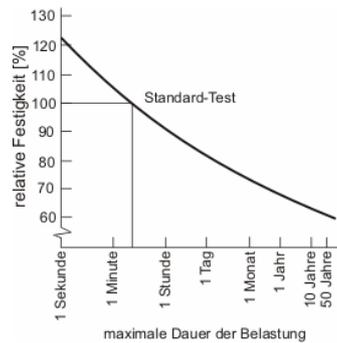
In Abhängigkeit von der Lasteinwirkung wird zwischen statischer und dynamischer Beanspruchung unterschieden. Der Zeiteinfluss ist auch bei allen klassischen mechanischen Prüfungen im Kurzzeitversuch vorhanden. Daher ist die maximale Zeitdauer bis zum Bruch genormt (z. B. nach EN 310 bei der Biegeprüfung 60 s \pm 30 s).



a)



b)



c)

Abb. 16: Wichtige Einflussgrößen auf die Festigkeit des Holzes

- a) Faser-Last-Winkel
- b) Rohdichte
- c) Belastungsart (dynamisch, statisch)
- d) Einfluss des Winkels zwischen radialer und tangentialer Richtung (Jahrringneigung)

Zusätzlich werden alle mechanischen Eigenschaften durch folgende Parameter beeinflusst:

- Holzfeuchte (mit zunehmender Holzfeuchte, etwa oberhalb von 5-8 %, sinkt die Festigkeit bis zur Fasersättigung etwa linear ab. Nach Angaben des US Forest Products Laboratory (zitiert in von Halász und Scheer (1986)) bewirkt 1% Holzfeuchteänderung im Holzfeuchtebereich von 8-18% folgende Abnahme der Holzeigenschaften:
Druckfestigkeit: 6%
Zugfestigkeit: 3%
Biegefestigkeit: 4%)
- Temperatur (die Festigkeit sinkt mit steigender Temperatur)
- mechanische oder klimatische Vorbeanspruchungen (z. B. bei Lagerung im Wechselklima)
- Bauteilgrösse

Bei Holz in Bauholzabmessungen wird die Festigkeit insbesondere durch Äste und den Faserverlauf deutlich beeinflusst (siehe z.B. Görlacher (1990)). Die Festigkeit sinkt mit zunehmendem Astanteil. Die Festigkeitseigenschaften von Bauholz sind daher geringer als die von kleinen, fehlerfreien Proben. Rundholz hat etwa um 10% höhere Festigkeits-

eigenschaften als Schnittholz, da bei der Schnittholzerstellung die Fasern angeschnitten werden und so ein etwas schräger Faserverlauf vorliegt.

Madson und Buchanan (1986) geben für Holz folgende Beziehung für die Bauteilgrösse an:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^m \cong \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^{ml} \cdot \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{mb} \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{md} \quad (Gl. 19)$$

Für die 10 %- Fraktile gilt beispielsweise:

V- Volumen des Prüfkörpers

σ - vorhandene Spannungen

l- Länge, b- Breite, d-Dicke des Prüfkörpers

Für die Koeffizienten m gilt z.B.

$$m_l = 0,15$$

$$m_b = 0,10$$

Nach Untersuchungen von Burger und Glos (1996) sinkt bei Bauholz die Festigkeit mit zunehmender Länge der Proben. Da breitere Proben weniger Äste haben, steigt die Festigkeit mit zunehmender Breite.

Nach Weibull (Theorie des schwächsten Kettengliedes) ergibt sich:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1/k} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^m \quad (Gl.20)$$

σ vorhandene Spannungen

V Volumen des Prüfkörpers

k Formparameter der Weibull-Verteilung

m Exponent

Die Eigenschaften von Bauteilen werden in Festigkeitsklassen nach EN 338 festgelegt. Dabei gibt es für Nadelholz die Klassen (Nr. der Klasse korreliert mit charakteristischem Wert für Biegefestigkeit in N/mm²) C14, C16, C18, C22, C24, C27, C30, C35, C40 und für Laubholz D30, D35, D40, D60, D70.

10. Literaturverzeichnis

Die Literatur ist nachfolgend nach Fachbüchern sowie Zeitschriftenaufsätzen und Dissertationen geordnet, um einen leichten Einstieg in weiterführende Arbeiten zu finden.

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.
- Bucur, V. (1995): Acoustics of Wood. CRC Press, Boca Raton, New York, Tokio, 284 S.
- Bucur, V. (2004): Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. Springer Verlag, Berlin, 354 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.; Côté, 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.
- Pozgaj, A.; Chonovec, D.; Kurjatko, S.; Babiak M. (1993): Struktura a vlosnost dreva. Priroda, Bratislava
- Sell, J. (1997): Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. 4. Aufl. Zürich, Baufachverlag, 87 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

Fachzeitschriften und Tagungsbände

- Altenbach, H.; Altenbach, J.; Rickards, R. (1996): Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke. Stuttgart, Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie.
- Burmester, A. (1970): Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit. Grundlagen und Vergütungsverfahren. BAM Bericht Nr. 4, Berlin, 179 S.
- Burger, N.; Glos, P. (1996): Einfluss der Holzabmessungen auf die Zugfestigkeit von Bauschnittholz. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, Bd. 54, S. 333-340
- Eldag, H. (1997): Engineered Wood Products. Holz-Zentralblatt, Stuttgart, S. 1577, 1644, 1645
- Gehri, E.; Mischler, A. (1995): Holztragwerke, Entwurfs- und Konstruktionsregeln. Lignatec 2/1995, Lignum, Zürich
- Gustafsson, P.J.; Hoffmeyer, P.; Valentin, G. (1998): DOL behaviour of end-notched beams. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, Bd. 56, S. 307-317
- Görlacher, R. (1990): Klassifizierung von Brettschichtholz-Lamellen durch Longitudinalschwingungen. Forschungsbericht, Universität Karlsruhe
- Keylwerth, R. (1969): Praktische Untersuchungen zum Holzfeuchtigkeits-Gleichgewicht. Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin, Bd. 31, S. 285-290
- Graf, E.; Meili, M. (2001): Holzzerstörende Pilze und Insekten. Lignatec 14/2001, Lignum, Zürich
- Krauss, A. (1988): Untersuchungen über den Quelldruck des Holzes in Faserrich-

- tung. *Holzforschung und Holzverwertung*, Wien, Bd. 40, S. 65-72
- Lehmann, E.; Vontobel, P.; Niemz, P. (2000): The method of neutron radiography and its use for wood properties analysis. *Proceedings, International Conference on Wood and Fiber Composites*, Stuttgart.
- Merz, K.; Fischer, J.; Brunner R.; Baumberger, M. (1997): Holzprodukte für den statischen Einsatz: Teil 1 - Plattenförmige Produkte. *Lignatec 5/1997*, Lignum, Zürich
- Merz, K.; Fischer, J.; Brunner R.; Baumberger, M. (1998): Holzprodukte für den statischen Einsatz: Teil 2 - Stabförmige Bauteile für Träger und Stützen. *Lignatec 7/1998*, Lignum, Zürich
- Merz, K.; Fischer, J.; Strahm, T.; Schuler, B. (1999): Holzprodukte für den statischen Einsatz: Teil 3 - Bausysteme für Wand, Decke und Dach. *Lignatec 9/1999*, Lignum, Zürich
- Navi, P. und Girardet, F. (2000): Effects of Thermo-Hydromechanical Treatment on Structure and Properties of Wood. *Holzforschung* Bd. 54; S.287-293
- Niemz, P. (1989): Zur Anwendung der Schallemissionsanalyse in der Holzforschung. *Holz-Zentralblatt*, Stuttgart, Bd. 112, S. 1704
- Niemz, P. (1997): Ermittlung von Eigenspannungen in Holz und Holzwerkstoffen. *Holz-Zentralblatt*, Stuttgart, Bd. 122, S. 84, 86
- Niemz, P. (2001): Wasseraufnahme von Holz und Holzwerkstoffen. *Holz-Zentralblatt*, Stuttgart, Bd. 6, S. 100
- Niemz, P. (2003): Schallausbreitung in Holz und Holzwerkstoffen. *Holz-Zentralblatt*, Stuttgart, Bd. 102, S. 1470-1471
- Niemz, P.; Diener, M. (1999): Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Bruchzähigkeit an Holzwerkstoffen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, Bd. 57, S. 222-224
- Ouis, D. (1999): Vibrational and acoustical experiments on logs of Spruce. *Wood Sc. and technology* 33: 151-184
- Okano, T. (1978): Holz und Wohnbehaglichkeit.- Untersuchungen an Testhäusern. In Hachioji (Japan). *Makuazzai Kogyo*, Bd. 33, S. 418-423
- Pellerin, R.; Ross, R. (2002): *Nondestructive Evaluation of wood*. Forest Prod. Society, Madison WI
- Perkitny, T. (1960): Die Druckschwankungen in verschiedenen, vorgepressten und dann starr eingeklemmten Holzkörpern. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, Bd. 18, S. 200-210
- Popper, R. (1985): Das Holz-Sorbat-System mit Rücksicht auf die submikroskopische Betrachtungsweise. In: Kucera, L.J. (Hrsg.): *Xylorama*. Birkhäuser Verlag, Basel, S. 155-163
- Popper, R.; Bariska, M. (1972): Die Acylierung des Holzes. 1. Mitteilung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, Bd. 30, S. 289-294
- Popper, R.; Bariska, M. (1973): Die Acylierung des Holzes. 2. Mitteilung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, Bd. 31, S. 65-70
- Popper, R.; Bariska, M. (1975): Die Acylierung des Holzes. 3. Mitteilung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, Bd. 33, S. 415-419
- Popper, R.; Gehri, E.; Eberle, G. (1998): Querbewehrung von Kantholzplatten mit Holzstäben. Zwangsbeanspruchung infolge Feuchtigkeit. *Drevarsky Vyskum*, Bra-

tislava, Bd. 43:1;S. 27-36

Popper,R.; Gehri, E.; Eberle,G. (1999): Mechanosorptive Eigenschaften von bewehrtem Brettschichtholz bei zyklischer Klimabeanspruchung. Infolge Feuchte.

Drevarsky Vyskum, Bratislava , Bd. 44:1, S. 1-11

Popper, R.; Niemz, P.; Eberle, G. (2001): Festigkeits- und Feuchteverformungsänderungen entlang der Sorptionsisotherme. *Holzforschung und Holzverwertung*, Wien, Bd. 1, S. 16-18

Radovicz, B.; Cheret, P.; Heim, F. (1997): *Holzbauhandbuch*. Reihe 4 Baustoffe. Teil 4 Holzwerkstoffe. Folge 1 Konstruktive Holzwerkstoffe. Informationsdienst Holz

Schob, M.; Niemz, P.; Kucera, L. (1997): Einfluß von Fehlergröße und Meßanordnung auf die Schallgeschwindigkeit in Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, Bd. 55, S. 235-236.

Sell, J.; Fischer, J.; Wigger, U. (2001): *Oberflächenschutz von Holzfassaden*. Lignatec 13/2001, Lignum, Zürich

Sell, J.; Graf, E.; Richter, S.; Fischer, J. (1995): *Holzschutz im Bauwesen*, EMPA/Lignum-Richtlinie, Lignatec, 1/1995 Lignum, Zürich

Sell, J. (1999): *Coastings of wood based panels*. Tagungsband, 2. Europäisches Holzwerkstoffsymposium, Hannover

Stanzl-Tschegg, S.E.; Tan, D.M.; Tschegg E.K. (1995): New splitting method for wood fracture characterization. *Wood Science and Technology*, Bd. 29, S. 30-50

Steller, S.; Lexa, J. (1987): *Problematik der Lebensdauer von Holz und Holzkonstruktionen*. *Bauforschung und Baupraxis*, Berlin, Bd. 105

Schwab, E. (1990): *Die Härte von Laubhölzern für die Parkettherstellung*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Berlin, Bd. 48, S. 47-51

Stübi, T.; Niemz, P. (2000): *Neues Messgerät zur Bestimmung der Härte*. *Holz-Zentralblatt*, Stuttgart. Bd. 125, S. 1524, 1526

Taylor, S.; Bender, D.; Kline, D.; Kline, K. (1992): Comparing length effect models for lumber tensile strength. *For-Prod-J. Madison, Forest Products Research Society*. Bd. 42 (2), S. 23-30

Valentin, G.H.; Boström, L.; Gustafsson, P.J.; Ranta-Maunus, A. (1991): *Application of fracture mechanics to timber structures RILEM state of the art-report*. Valtio Teknillinen Tutkimuskeskus Statens Tekniska Forskingscentral Technical Research Centre of Finland, Espoo

Dissertationen

Burgert, I. (2000): *Die mechanische Bedeutung der Holzstrahlen im lebenden Baum*. Diss. Universität Hamburg

Eberhardsteiner, J. (2002): *Mechanisches Verhalten von Fichtenholz- Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften*. Springer Verlag, Berlin

Gressel, P. (1971): *Untersuchungen über das Zeitstandsbiegeverhalten von Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von Klima und Belastung*. Diss. Universität Hamburg

Grimsel, M. (1999): *Mechanisches Verhalten von Holz*. Diss. TU Dresden

Hanhijärvi, A. (1995): *Modelling of creep deformation mechanism in wood*. Diss. Technical research Centre of Finland, Espoo

- Neuhaus, H.F. (1981): Elastizitätszahlen von Fichtenholz. Diss. Ruhruniversität Bochum
- Niemz, P. (1982): Untersuchungen zum Kriechverhalten von Spanplatten unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Werkstoffstruktur. Diss. TU Dresden
- Persson, K. (2000): Micromechanical Modelling of Wood and Fibre Properties. Diss. Universität Lund
- Scheffler, M. (2000): Bruchmechanische Untersuchungen zur Trocknungsrissebildung an Laubholz. Diss. TU Dresden
- Steiger, R. (1996): Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten-Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter Belastung. Diss. ETH Zürich

Anlagen

Anlage 1: Wichtige Normen zur Holzphysik

Allgemeine Normen

- DIN EN 1438 1998-10 Symbole für Holz und Holzwerkstoffe; Deutsche Fassung EN 1438 : 1998
- DIN EN 13556 2003-10 Rund- und Schnittholz – Nomenklatur der in Europa verwendeten Handelshölzer; Dreisprachige Fassung EN 13556 :2003

Sortierung nach der Tragfähigkeit

- DIN 4074-1 2003-06 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadel-schnittholz
- DIN 4074-2 1958-12 Bauholz für Holzbauteile; Gütebedingungen für Baurundholz (Nadelholz)
- DIN 4074-3 2003-06 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 3: Sortier-maschinen für Schnittholz; Anforderungen und Prüfung
- DIN 4074-4 2003-06 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 4: Nachweis der Eignung zur maschinellen Schnittholzsortierung
- DIN 4074-5 2003-06 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laub-schnittholz / Achtung: Gilt in Verbindung mit DIN 6779-1 und DIN 6779-2

Prüfung

- DIN 52180-1 1977-11 Prüfung von Holz; Probenahme, Grundlagen
- DIN 52181 1975-08 Bestimmung der Wuchseigenschaften von Nadelholz (vgl. DIN EN 1310)
- DIN 52182 1976-09 Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte
- DIN 52183 1977-11 Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes
- DIN 52184 1979-05 Prüfung von Holz; Bestimmung der Quellung und Schwindung

| | | |
|-------------|---------|--|
| DIN 52185 | 1976-09 | Prüfung von Holz; Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser |
| DIN 52186 | 1978-06 | Prüfung von Holz; Biegeversuch |
| DIN 52187 | 1979-05 | Prüfung von Holz; Bestimmung der Scherfestigkeit in Faser-richtung |
| DIN 52188 | 1979-05 | Prüfung von Holz; Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser |
| DIN 52189-1 | 1981-12 | Prüfung von Holz; Schlagbiegeversuch; Bestimmung der Bruchschlagarbeit |
| DIN 52192 | 1979-05 | Prüfung von Holz; Druckversuch quer zur Faserrichtung |
| DIN 68367 | 1976-01 | Bestimmung von Güteigenschaften von Laubholz (vgl. DIN EN 1310) |
| DIN EN 1533 | 2000-04 | Parkett und anderer Holzfussböden – Bestimmung der Biege-eigenschaften – Prüfmethode; Deutsche Fassung EN 1533 : 2000 |
| DIN EN 1534 | 2000-04 | Parkett und anderer Holzfussböden – Bestimmung des Ein-druckwiderstandes (Brinell) – Prüfmethode; Deutsche Fassung EN 1534: 2000 |
| DIN EN 1910 | 2000-03 | Parkett und anderer Holzfussböden und Wand- und Deckenbe-kleidungen aus Holz – Bestimmung der Dimensionsstabilität; Deutsche Fassung EN 1910: 2000 |

Messung

| | | |
|------------------|----------------|---|
| DIN EN 1309-1 | 1997-08 | Rund- und Schnittholz – Verfahren zur Messung der Masse – Teil 1: Schnittholz; Deutsche Fassung EN 1309-1 : 1997 |
| DIN EN 1310 | 1997-08 | Rund- und Schnittholz – Messung der Merkmale; Deutsche Fassung EN 1310 : 1997 |
| DIN EN 1311 | 1997-08 | Rund- und Schnittholz – Verfahren zur Messung von Schäd-lingsbefall; Deutsche Fassung EN 1311: 1997 |
| DIN EN 13183-1 | 2002-07 | Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren; Deutsche Fassung EN 13183-1:2002 |
| DIN EN 13183-1 | Berichtigung 1 | 2003-12 Berichtigungen zu DIN EN 13183-1:2002-07 |
| DIN EN 13183-2 | 2002-07 | Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren; Deutsche Fas-sung EN 13183-2:2002 |
| DIN EN 13183-2 | Berichtigung 1 | 2003-12 Berichtigungen zu DIN EN 13183-2:2002-07 |
| E DIN EN 13183-3 | 2003-06 | Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 3: Schätzung durch kapazitives Messverfahren; Deutsche Fas-sung prEN 13183-3:2003 |

Verzeichnis Internationaler Normen der ISO für Vollholz (DIN-Normen zum selben Thema in Klammern)

| | |
|----------|--|
| ISO 1030 | 1975-12 Nadelschnittholz; Fehler; Messung (DIN 52181) |
| ISO 1031 | 1974-12 Nadelschnittholz; Fehler; Begriffe und Definitionen (DIN 68256) |
| ISO 3129 | 1975-11 Holz; Stichprobenverfahren und allgemeine Anforderungen an physikalische und mechanische Prüfungen (DIN 52180-1) |
| ISO 3130 | 1975-11 Holz; Feuchtigkeitsbestimmung bei physikalischen und mechanischen Prüfungen (DIN 52183) |
| ISO 3131 | 1975-11 Holz; Dichtebestimmungen bei physikalischen und mechanischen Prüfungen (DIN 52182) |
| ISO 3132 | 1975-11 Holz; Bestimmung der Druckfestigkeit senkrecht zur Faserichtung (DIN 52192) |
| ISO 3133 | 1975-11 Holz; Bestimmung der Biege(bruch)festigkeit bei statischer Belastung (DIN 52186) |
| ISO 3345 | 1975-09 Holz; Bestimmung der maximalen Zugspannung (Bruchspannung) parallel zur Faser (DIN 52188) |
| ISO 3347 | 1976-01 Holz; Bestimmung der höchsten Scherspannung (Scherbruchspannung) parallel zur Faser (DIN 52187) |
| ISO 3348 | 1975-08 Holz; Bestimmung der Schlagbiegefestigkeit (DIN 52189-1) |

Anlage 2: Materialkennwerte

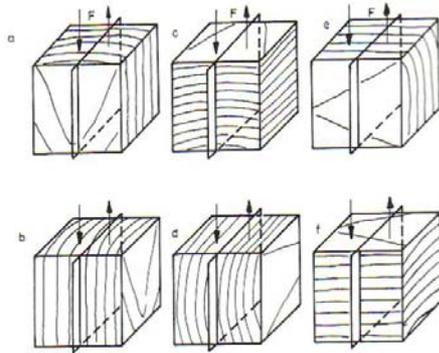
Tabelle 1: Eigenschaften (Mittelwerte) ausgewählter Holzarten nach Sell (1997)

| Holzart | Rohdichte ρ_{15} (g/cm ³) | Darrdichte (g/cm ³) | Druckfestigkeit (N/mm ²) | Zugfestigkeit (N/mm ²) | Biegefestigkeit (N/mm ²) | E-Modul (N/mm ²) parallel | Scherfestigkeit parallel (N/mm ²) | Bruchschlagarbeit (Nm/cm ²) | Härte nach Brinell (N/mm ²)H _B parallel | Härte nach Brinell (N/mm ²)H _B senkrecht | differentielles Schwindmass | | Wärmeleitfähigkeit (W/mK) |
|----------------|---|------------------------------------|---|---------------------------------------|---|--|--|--|---|--|-----------------------------|----------------|------------------------------|
| | | | | | | | | | | | % (radial) | % (tangential) | |
| Douglasie | 0.545 | 0.5 | 55 | 93.5 | 85 | 12100 | 8.6 | 4.85 | 44 | 18.5 | 0.17 | 0.275 | 0.12 |
| Eibe | 0.675 | 0.63 | 57 | 108 | 85 | 15700 | | 14.7 | 68 | 30 | 0.15 | 0.27 | |
| Fichte | 0.45 | 0.415 | 45 | 85 | 71 | 11000 | 6.25 | 4.5 | 31 | 14 | 0.17 | 0.315 | 0.11 |
| Hemlock | 0.485 | 0.45 | 45 | 68 | 75 | 10000 | 7.75 | 4.45 | 35 | 14 | 0.155 | 0.285 | 0.15 |
| Kiefer | 0.53 | 0.485 | 50 | 102 | 89.5 | 11900 | 9.2 | 5.5 | 40 | 18.5 | 0.17 | 0.305 | 0.14 |
| Lärche | 0.58 | 0.54 | 54 | 101 | 94 | 12550 | 9.85 | 6.3 | 49.5 | 22 | 0.16 | 0.32 | 0.12 |
| Radiata-Kiefer | 0.495 | 0.46 | 40 | 79 | 67.5 | 9950 | 7.15 | | | 13 | 0.14 | 0.245 | |
| Redwood | 0.41 | 0.385 | 35 | 76 | 60 | 7850 | 6 | 3 | 27 | 12 | 0.13 | 0.205 | |
| Tanne | 0.45 | 0.425 | 46 | 86 | 68 | 12250 | 6.2 | 4 | 31 | 14.5 | 0.14 | 0.315 | 0.12 |
| Balsa | 0.16 | 0.14 | 10 | 30 | 19 | 2900 | 1.05 | 0.3 | 5.5 | 2.5 | 0.085 | 0.185 | 0.055 |
| Birke | 0.68 | 0.645 | 51 | 135 | 132 | 14750 | 13 | 8.75 | 48 | 28.5 | 0.21 | 0.285 | |
| Buche | 0.76 | 0.68 | 58 | 117 | 108 | 14350 | 8.85 | 10 | 71 | 34.5 | 0.21 | 0.41 | 0.16 |
| Edelkastanie | 0.58 | 0.53 | 46 | 128.5 | 81.5 | 9500 | 8.55 | 5.65 | 35.5 | 19 | 0.14 | 0.265 | |
| Eiche | 0.705 | 0.65 | 58 | 99 | 97 | 12500 | 10.4 | 6.2 | 57.5 | 32.5 | 0.2 | 0.315 | 0.165 |
| Erle | 0.53 | 0.495 | 47 | 81 | 87.5 | 9500 | 4.7 | 5.1 | 34.5 | 12 | 0.16 | 0.27 | |
| Esche | 0.72 | 0.67 | 51 | 145 | 113.5 | 12900 | 12.7 | 7.75 | 64 | 38 | 0.19 | 0.325 | 0.15 |
| Pappel | 0.525 | 0.425 | 33 | 72.5 | 65 | 8850 | 6 | 4.35 | 29 | 12.5 | 0.155 | 0.28 | 0.125 |
| Platane | 0.64 | 0.59 | 52 | 98 | 108.5 | 10300 | 10.9 | 6.6 | 45 | 26.5 | 0.165 | 0.305 | |
| Pockholz | 1.255 | 1.165 | 103 | 129 | 129 | 12000 | | 3.75 | 160 | 87.5 | 0.25 | 0.38 | |
| Robinie | 0.77 | 0.72 | 65 | 131.5 | 132 | 13350 | 14.25 | 14.1 | 71 | 48.5 | 0.23 | 0.35 | |

Tabelle 2: Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung für die Belastungsrichtungen a-d, e und f nicht geprüft

| | | Scherebene/Kraftrichtung | | | |
|----------------------|---|--------------------------|-------|------|------|
| | | a | b | c | d |
| Fichte | | | | | |
| Rohdichte | x | 0,43 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| [g/cm ³] | s | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| Scherfestigkeit | x | 9,89 | 8,73 | 2,83 | 2,49 |
| [N/mm ²] | s | 1,10 | 0,50 | 0,64 | 0,65 |
| Buche | | | | | |
| Rohdichte | x | 0,68 | 0,69 | 0,69 | 0,71 |
| [g/cm ³] | s | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 |
| Scherfestigkeit | x | 14,31 | 18,34 | 6,88 | 9,36 |
| [N/mm ²] | s | 0,89 | 1,29 | 1,10 | 2,37 |

n = 30 Proben je Richtung



- a) Scherebene Radialfläche, Belastung parallel zur Faser
- b) Scherebene Tangentialfläche, Belastung parallel zur Faser
- c) Scherebene Radialfläche, Belastung senkrecht zur Faser
- d) Scherebene Tangentialfläche, Belastung senkrecht zur Faser
- e) Scherebene Hirnfläche, Belastung senkrecht zur Faser, in tangentialer Richtung
- f) Scherebene Hirnfläche, Belastung senkrecht zur Faser, in radialer Richtung

Tabelle 3: Ausgewählte Kennwerte elastischer Eigenschaften für Fichte nach verschiedenen Autoren. 1. Index: Richtung der Kraft. 2. Index: Richtung der Dehnung

| Autor | | Holzfeuchte in % | 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} | μ_{RL} μ_{TL} μ_{TR} | μ_{LR} μ_{LT} μ_{RT} |
|--|-------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|--|--|
| N° | | (%) | (N/mm ²) | (-) | (N/mm ²) | (-) | (-) | (-) |
| 1 | DIN 68364 | 12 | 10000 800 450 | 12.5 22.2 1.8 | 650 600 | 1.1 | 0.27 | 0.33 |
| 2 | [Neuhaus 1981] | 12 | 11990 817 420 | 14.7 28.6 1.9 | 743 624 42 | 1.2 17.5 14.7 | 0.055 0.035 0.311 | 0.41 0.549 0.59 |
| 3 | Krabbe 1) | 12.2 | 11364 1109 588 | 10.2 19.3 1.9 | 742 686 36 | 1.1 20.4 18.9 | | |
| 4 | Hörig | 9.8 | 16233 699 400 | 23.2 40.6 1.7 | 629 775 37 | 0.8 17 21 | 0.019 0.013 0.24 | 0.43 0.53 0.42 |
| 5 | Wommels-Dorf ¹⁾ | 13.7 | 11287 980 429 | 11.5 26.3 2.3 | | | 0.049 0.028 0.26 | 0.447 0.561 0.586 |
| 6 | [Bodig et al. 1982] | 12 | 10940 830 493 | 13.2 22.2 1.7 | 699 663 66 | 1.1 10.6 10 | | |
| 7 | [Neuhaus 1994] | 12 | 12048 818 420 | 14.7 28.7 1.9 | 744 623 42 | 1.2 17.5 14.7 | 0.055 0.035 0.31 | 0.41 0.554 0.599 |
| 8 | Hearmon ²⁾ 1948 | 12 | 13760 910 490 | 15.1 28.1 1.9 | 730 510 30 | 1.4 24.3 17 | 0.03 | 0.536 0.6 |
| ¹⁾ zitiert in [Neuhaus 1981] | | | | | | | | |
| ²⁾ zitiert in [Kollmann 1975] | | | | | | | | |

Tabelle 4: Poissonsche Konstanten für Laub- und Nadelhölzer nach Bodig und Jayne (1993)

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

Tabelle 5: Rechenwerte für die charakteristischen Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte für Nadelholz (Auszug aus DIN EN 338)

| 1 | Festigkeitsklasse (Sortierklasse nach DIN 4074-1) | C 16 (S7) | C18 | C24 | C27 | C30 | C35 | C 40 |
|--|---|--------------|------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| Festigkeitskennwerte in N/mm² | | | | | | | | |
| 2 | Biegung $f_{m,k}$ | 16 | 18 | 24 | 27 | 30 | 35 | 40 |
| 3 | Zug parallel $f_{t,0,k}$ ¹⁾ | 10 | 11 | 14 | 16 | 18 | 21 | 24 |
| 4 | Druck parallel $f_{c,0,k}$ | 17 | 18 | 21 | 22 | 23 | 25 | 26 |
| 5 | rechtwinklig $f_{c,90,k}$ ²⁾ | 2.2 | 2.2 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 | 2.9 |
| 6 | Schub und Torsion $f_{v,k}$ ³⁾ | 1.8 | 2 | 2.5 | 2.8 | 3 | 3.4 | 3.8 |
| Steifigkeitskennwerte in N/mm² | | | | | | | | |
| 7 | Elastizitätsmodul parallel $E_{0,mean}$ ⁴⁾ | 8000 | 9000 | 11000 | 11500 | 12000 | 13000 | 14000 |
| 8 | rechtwinklig $E_{90,mean}$ ⁴⁾ | 270 | 300 | 370 | 380 | 400 | 430 | 470 |
| 9 | Schubmodul G_{mean} ⁴⁾⁵⁾ | 500 | 560 | 690 | 720 | 750 | 810 | 880 |
| Rohdichtekennwerte in kg/m³ | | | | | | | | |
| 10 | Rohdichte ρ_k | 310 | 320 | 350 ⁶⁾ | 370 | 380 | 400 | 420 |

1) 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/mm² anzunehmen.

2) 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 $f_{R,k} = 0,4$ N/mm² 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 $\rho_k = 380$ kg/m³ angenommen werden.

Tabelle 6: Bruchzähigkeitskennwerte K_{IC} für Fichte (Messungen: Niemz)

1. Index Krafrichtung; 2. Index Richtung der Rissausbreitung

| Belastungsart | Holzfeuchte [%] | Bruchzähigkeit K_{IC} [$Nmm^{-3/2}$] |
|---------------|-----------------|--|
| RT | 8 | 160 |
| | 12 | 214 |
| | 20 | 194 |
| TR | 8 | 128 |
| | 12 | 204 |
| | 20 | 149 |
| LT | 12 | 595 |
| TL | 12 | 230 |
| RL | 12 | 383 |
| LR | 12 | 986 |