

# Holz: Struktur und Eigenschaften

## (Skript zur Vorlesung)

### **Educational Material**

**Author(s):**

Zürcher, Ernst; Niemz, Peter

**Publication date:**

2011

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006698760>

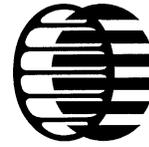
**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Ecole polytechnique fédérale de Zurich  
Politecnico federale di Zurigo

**IfB**  
**Institut für Baustoffe**  
**Holzphysik**



# **HOLZ: STRUKTUR UND EIGENSCHAFTEN**

(Skript zur Vorlesung)

**Ausgabe 2011**

**Prof. Dr. Ernst Zürcher, Berner Fachhochschule, Biel  
(Anatomie und Chemie des Holzes)**

**Prof. Dr. Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz, ETH Zürich,  
Institut für Baustoffe, Holzphysik  
(Physik des Holzes)**

# Kapitel

## Anatomie und Chemie des Holzes

Von Prof. Dr. sc. nat., Dipl. Forsting. ETHZ Ernst Zürcher, Berner Fachhochschule / Architektur, Holz und Bau, Biel-Bienne

Im vorliegenden Skript werden folgende Schwerpunkte im Bereich Anatomie und Chemie des Holzes dargestellt:

- Darstellung der Funktionsweise der Bäume und der entsprechenden anatomischen Strukturen der Nadel- und Laubhölzer
- Praktische Mikroskopie-Übungen und Bestimmungstest
- Parallel dazu: Erkennen und Interpretieren der Holzarten auf Makroskopischer Ebene
- Präsentation der chemischen Zusammensetzung und Eigenschaften von Holz

# DER BAUM UND SEINE LEBENSPROZESSE

## Der Baum, sein Holz und ihre Beziehungen zum Menschen

Als Basisglied des Waldes spielt der Baum eine zentrale Rolle bei den wohlbekannten Leistungen, die der Wald als Landschaftselement und als Wirtschaftsgrundlage der modernen Gesellschaft entgegenbringt. Sollen diese Leistungen geschützt, nachhaltig erhalten oder gefördert werden, dann müssen sich die Einzelmassnahmen spezifisch auf den Baum beziehen, auf die Kenntnis seiner Lebensabläufe und der direkt daraus resultierenden Holzeigenschaften. Einige Fragenbeispiele in diesem Zusammenhang:

### Nutzleistungen [aus BUWAL 1999]

- Holz Holz ist ein wichtiger erneuerbarer einheimischer Rohstoff und Energieträger. Er garantiert rund 90'000 Arbeitsplätze

Wie lassen sich Verwendungen aus den Strukturen, den chemischen und physikalischen Eigenschaften erklären und weiterentwickeln?

### Schutzleistungen

- Lawinen Die Bäume halten die Schneedecke fest und verhindern das Anreissen von Lawinen
- Hochwasser Der Waldboden wirkt wie ein Schwamm. Hochwassergefahren werden gedämpft.
- Steinschlag Die Bäume halten Steine auf
- Bodenerosion Das Wurzelwerk der Pflanzen hält die Erde zusammen
- Wind Die Bäume dienen als Windschutzstreifen

Auch Holz wird für diese Leistung verwendet: welches ist das Geeignetste?

Wie funktionieren die Wasserkreisläufe zwischen Krone und Wurzelsystem?

Was ist Wundheilung bei Bäumen? Rolle chemischer Substanzen bei der Dauerhaftigkeit des Holzes.

Wurzel als Anker: wie hoch ist die Zugfestigkeit des Holzes?

Wie sind die inneren Spannungen des Stammes verteilt und wieso? Wie bestimmt man die Biegefestigkeit?

### Wohlfahrtsleistungen / Ökologische Leistungen

- Lebensraum Wald = naturnahe und differenzierte Lebensgemeinschaft
- Erholungs- / Erlebnisraum Da kann der Mensch seine Beziehung zur Natur pflegen, sich entspannen
- Gliederung d. Landschaft Die mosaikartige Verteilung des Waldes prägt unsere Kulturlandschaft
- Produktion v. Sauerstoff Die Bäume nehmen Kohlendioxid auf und geben lebenswichtigen Sauerstoff ab
- Wasserfilter u. -speicher Der Wald stellt unsere Trinkwasserversorgung sicher
- Luftfilter und Lärmschutz Der Wald hilft mit, unsere verschmutzte Luft zu reinigen und Lärm fernzuhalten
- Klima-Extreme Im Wald: ein ausgeglichenes Innenklima

Gibt es auch eine Biodiversität des Holzes ("Xylodiversität")?

Bildet Holz im Bauwesen nicht auch einen Erlebnisraum?

In welchen Verwendungen prägen Holz und Derivate unser Kulturleben?

Gibt es nicht auch eine Atmung bei den Bäumen, mit Kohlenstoffabgabe?

Gelten Baum und Wald als zentraler Faktor des Gesamtwasserkreislaufes?

Welche Mengen Luft werden bei der Photosynthese verarbeitet / gereinigt?

Was leisten Wald u. Holz für den CO<sub>2</sub>-Ausgleich (Anti-Treibhauseffekt)?

### Frage:

- Welche neue Funktion ist in den letzten Jahren hinzugekommen?

## ZUR PHYSIOLOGIE

## Inhaltsverzeichnis

Die Leistungen eines Baumes	3
Einige weitere Zahlen und Dimensionen	4
Photosynthese	5
Formel	
Lichtenergie und Temperatur	
Kohlendioxid	
Wasser und Wind	
Innere Faktoren und Alterung	
Atmung	8
Ausgangssubstanzen, Orte, Energie	
Nettoprimärproduktion	
Jahreszuwachs an Biomasse	
Nachtatmungsanteil	
Achsenatmung und Wurzelatmung	
Saftstrom (Xylemstrom)	10
Wasseraufnahme	
Physiologie des Wassertransportes	
Physik des Wassertransportes	
Transpiration	
Assimilatstrom (Phloemstrom)	20
Vergleich mit dem Xylemstrom	
"Druck-Fluss-Mechanismus"	
Speicherung und Frostresistenz	

## Die Leistungen eines Baumes

Diese etwa  
100 Jahre alte Buche  
sollten Sie sich etwa 20 m hoch  
und mit etwa 12 m Kronendurchmesser vor-  
stellen. Mit ihren 600'000 Blättern verzehnfacht  
sie die 120 m<sup>2</sup>, die die Krone überdeckt, auf etwa  
1200 m<sup>2</sup> Blattfläche. Durch die Lufträume des Schwamm-  
gewebes entsteht eine Zelloberfläche für den Gasaustausch von  
etwa 15'000 m<sup>2</sup>, also zwei Fussballfeldern! 9400 Liter = 18 Kg Kohlen-  
dioxid verarbeitet dieser Baum an einem Sonnentag. Das ist der  
durchschnittliche Kohlendioxidabfall von zweieinhalb Einfamilien-  
häusern. Bei einem Gehalt von 0.03 % Kohlendioxid in der Luft müssen  
etwa 36'000 m<sup>3</sup> Luft durch diese Blätter strömen, mitsamt den enthaltenen  
Bakterien, Pilzsporen, dem Staub und anderen schädlichen Stoffen, die  
dabei grösstenteils im Blatt hängen bleiben. Gleichzeitig wird die Luft  
angefeuchtet, denn etwa 400 Liter Wasser verbraucht und verdunstet der  
Baum an demselben Tag. Die 13 kg Sauerstoff, die dabei vom Baum  
durch die Photosynthese als Nebenprodukt erarbeitet werden, decken  
den Bedarf von 10 Menschen. Für sich produziert der Baum an  
diesem Tag 12 kg Zucker, aus dem er alle seine organischen  
Stoffe aufbaut. Einen Teil speichert er als Stärke, aus einem  
anderen baut er neues Holz. Am Ende dieser Vegetations-  
periode wird es wieder einmal ca. 0.2 m<sup>3</sup> mehr sein.  
Wenn der Baum gefällt wird, im Verlauf der normalen  
Waldbewirtschaftung, zur bequemeren Bearbeitung  
des Ackers, auf Antrag des Automobilclubs  
weil der Baum zu  
nah an der Strasse  
steht oder weil  
gerade dort ein  
Geräteschuppen  
aufgestellt werden  
soll, so müsste  
man (falls keine  
Naturverjüngung  
vorkommt) etwa  
2'000 junge Bäume  
mit einem Kronenvolumen  
von 1 m<sup>3</sup> pflanzen, wollte man ihn ökologisch vollwertig  
ersetzen. Die Kosten dafür dürften ca. Fr. 280'000.- betragen.

Ergänzt nach GBA Pe / 92

Ce Hêtre  
âgé d'environ 100 ans  
représente pour vous un arbre d'une  
vingtaine de mètres de hauteur avec un diamètre du  
houppier de 12 m. Au moyen de ses 600 000 feuilles, il décuple les  
120 m<sup>2</sup> de surface occupée par la frondaison en une aire foliaire de 1 200 m<sup>2</sup>.  
Par les alvéoles des tissus foliaires, une surface cellulaire responsable des  
échanges gazeux est constituée, d'une aire de 15 000 m<sup>2</sup>, ce qui équivaut à deux  
terrains de football! Par journée ensoleillée, une quantité de 9400 litres = 18 kg de  
dioxyde de carbone sont absorbés par cet arbre. Ceci représente la production  
moyenne en dioxyde de carbone de 2 ½ maisons familiales (déchets avec effet de  
serre). Vu que la teneur de l'air en dioxyde de carbone est de 0.03%, il faut que  
36 000 m<sup>3</sup> d'air diffusent à travers ces feuilles, avec toutes les bactéries, spores de  
champignons, poussières et autres substances nocives, dont une grande partie  
reste prise dans les tissus foliaires. Simultanément, l'air est humidifié, par les 400  
litres d'eau que l'arbre consomme et évapore ce jour-là. Les 13 kg d'oxygène  
produits par le travail photosynthétique couvrent les besoins de 10 personnes.  
Pour lui-même, l'arbre élabore dans ce laps de temps 12 kg de sucre,  
sur la base duquel toutes ses composés organiques sont construits.  
Une partie est mise en réserve sous forme d'amidon et  
de lipides, une partie est utilisée pour la constitution  
de nouvelles couches de bois. Lorsque l'arbre  
doit être abattu, pour faciliter la culture  
du champ, sur demande du Club  
Automobile, parce qu'il donne  
trop d'ombre ou  
parce qu'à cet  
endroit doit jus-  
tement être  
construit un  
hangar, il de-  
vrait pouvoir  
être remplacé  
par 2 000 jeu-  
nes arbres de  
1 m<sup>3</sup> de houp-  
pier, si l'on voulait le remplacer totalement dans ses prestations.  
Ce qu'il en coûterait s'élèverait à Fr. 280 000.- environ.

Prestations d'un arbre

3 bis

## Einige weitere Zahlen und Dimensionen

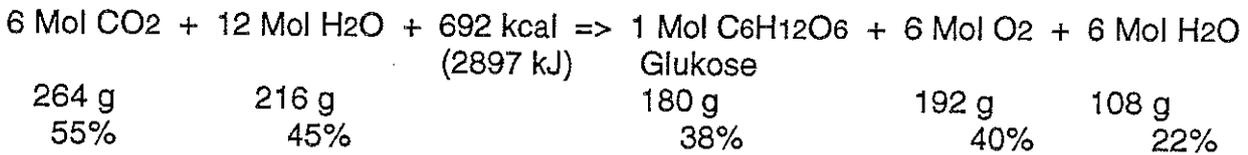
- Eine 200jährige Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco) trägt 65 Millionen Nadeln
- Der höchste heute bekannte lebende Baum ist eine Küsten-Sequoie (Redwood - *Sequoia sempervirens* D. Don), mit 112 m
- 1894 wurde eine Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco) von 125.7 m gefällt
- Bei den Laubbäumen wurde von einer südaustralischen Mountain Ash (*Eucalyptus regnans* F.v.Muell.) berichtet, mit 120 m
- Die massenreichsten Bäume sind die Mammutbäume (*Sequoiadendron giganteum* Lindl.): noch 14 Exemplare davon weisen mehr als 20'000 Kubikfuss (1132 m<sup>3</sup>) Holzmasse auf
- Einer der drei grössten davon, der "nur" 80 m hohe "General Grant" besitzt eine Holzmasse von etwa 800 atro-Tonnen (Gewicht im absolut trockenen Zustand), aus einem Stammvolumen von 1350 m<sup>3</sup>
- Von dieser Masse stammen 798.4 Tonnen (99.8%) aus der Luft, aus dem Wasser und in einem winzigen Ausmass indirekt aus dem Leben (Stickstoff-Lieferant) und bloss ca. 1.6 Tonnen (0.2%) aus bodenbürtigen Mineralien
- Die zwei anderen Holzriesen: Washington: 1400 m<sup>3</sup> / General Sherman: 1489 m<sup>3</sup> Stammholz - Totalvolumen 1550 m<sup>3</sup>
- Der dickste in Europa wachsende Mammutbaum steht in Corseaux sur Vevey / VD, mit einem Umfang 1 m über Boden von 12.56 m
- Der weltweit dickste Baum ist der mexikanische "El Gigante" (*Taxodium mucronatum* Ten.), mit 42 m Umfang, wahrscheinlich aus 3 zusammengewachsenen Exemplaren
- Der offiziell älteste Baum ist die 1972 erstmals beschriebene Bristlecone Pine (*Pinus longaeva* Bailey), mit einem Alter von 4'900 Jahren. Nadellebensdauer: bis 45 Jahre
- Die älteste verholzte Pflanze ist der Creosote Bush (*Larrea divaricata*) der Mojave-, Sonora- und Chihuahua-Wüsten, ein Strauch, der sich vegetativ ringförmig als Kolonie aus der Ursprungspflanze verbreitet und 12'000 Jahre erreicht
- Der älteste Baum Europas und vielleicht der Welt könnte die "Fortingall-Eibe" (*Taxus baccata* L.) in Schottland sein: als 2 getrennte Reste eines mit der Zeit hohl gewordenen Baumes erreicht sie heute einen Durchmesser von 5.4 m. Mangels Jahrringdatierungsmöglichkeit wird das Alter auf Grund von Vergleichen mit anderen Eiben auf ca. 5'000 Jahre extrapoliert

### Frage:

- Welche anatomische Struktur (Gewebe) macht solche Leistungen möglich und wie?

## Photosynthese

Die Photosynthese (Gr. *photos*, Licht, + *syn*, zusammen, + *tithenai*, fügen) bezeichnet die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie, durch die Bildung von Kohlenwasserstoffen aus Kohlendioxid und Wasser unter der Mitwirkung von Chlorophyll und Verwendung von Lichtenergie.



Dieser Prozess verleiht den Pflanzen den Charakter der Autotrophie. Dies bezeichnet Organismen, die fähig sind, die nötigen Nähr- und Aufbaustoffen aus anorganischen Substanzen der Umwelt zu bilden (im Gegensatz zur Heterotrophie = Abhängigkeit von fremdem organischem Material). Ein wichtiges Nebenprodukt der Photosynthese stellt der Sauerstoff dar, als unentbehrliches Element der meisten Lebensformen. Die Photosynthese ist ein Prozess, der bei Bäumen in einem Höchstmass realisiert wird: dank der Eroberung der dritten Dimension sind Baumbestände fähig, bis zu 20 t/ha/a an Trockensubstanz zu produzieren (tropischer Regenwald). Vor allem sind die Nadelhölzer die effizientesten Holzbildner, weil sie die ganze Energie und die Stoffe, die nicht für den jährlichen Ersatz der Laubmasse verwendet werden muss, in die Holzsubstanz umleiten.

Im weltweiten Masstab produzieren die Landpflanzen ca.  $5 \times 10^{10}$  t /a Trockensubstanz (d.h. 7 t pro Jahr und Erdbürger), davon 2/3 in Form von Wäldern.

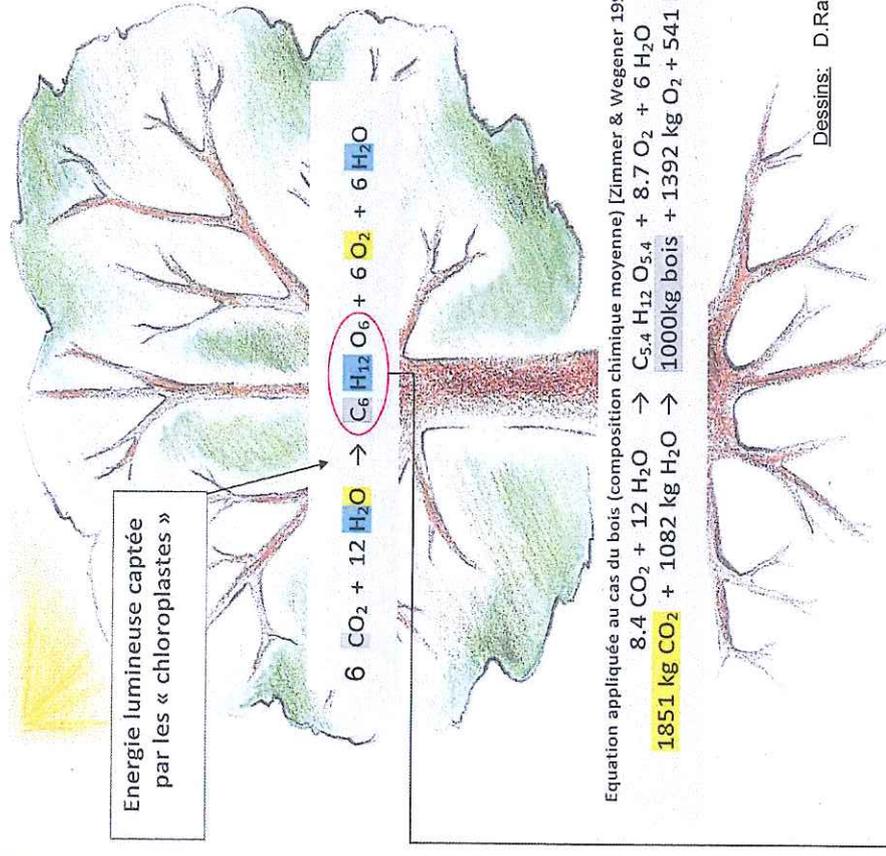
Die Photosynthese ist ein Vorgang, der unter spezifischen Bedingungen stattfindet:

Lichtenergie: die Beleuchtungsstärke, bei der die maximale Nettophotosynthese des einzelnen Lichtblattes (Bruttophotosynthese - Photorespiration im Inneren des Blattes) erreicht wird, liegt bei 20 - 50% der maximalen Freilandhelligkeit (an sonnigen Tagen 60'000 - 85'000 Lux). Da sich Blätter gegenseitig beschatten, kann die Photosynthese aller Blätter (Nadeln) zusammengenommen jedoch bis zur grössten Freilandhelligkeit ansteigen. Die Schattenblätter der unteren Äste (z.B. bei der Buche) atmen wesentlich weniger als die Lichtblätter. Sie erreichen den Kompensationspunkt zwischen Atmung und Photosynthese bei geringerer Lichtintensität und können das Licht zunächst effektiver nutzen. Schattenblätter sind entsprechend grösser als die Lichtblätter, haben eine dünnere Kutikula und verfügen über eine kleinere Zahl an Stomata und Chloroplasten pro Oberflächeneinheit (diese besitzen aber dichter gepackte Membransysteme). Schattenblätter sind im Vergleich zu Lichtblätter früher lichtgesättigt.

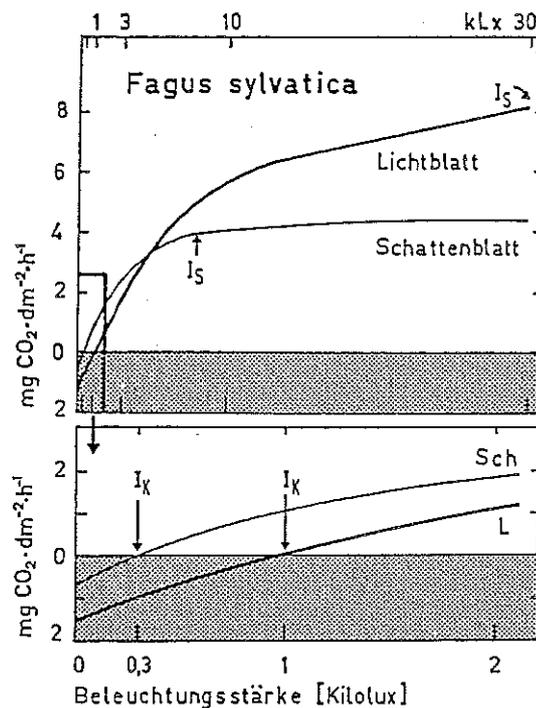
## Grundprozess

**Erneuerbare Materialien**  
=  
**Materialien, die direkt oder indirekt aus der aktuellen Photosynthese stammen**

Photosynthèse: seule source du "Renouvelable"



Sucres à l'origine de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine formant le bois !



**Abb.1:** CO<sub>2</sub>-Austausch (Nettphotosynthese) nach Lichtintensität, bei Schatten- und Lichtblättern.  $I_k$  = Lichtkompensation,  $I_s$  = Lichtsättigung. (Retter 1965, aus Larcher 1980, S.139)

Temperatur: Eine positive Nettoassimilation kann sich schon bei Temperaturen unter 0°C einstellen (Buche und Arve: - 6°C: in Blättern und Nadeln gefriert das Wasser erst unterhalb von diesem Punkt). Das Optimum erstreckt sich artspezifisch von 8 bis 25°C. Der maximale Bereich, wo eine positive Nettphotosynthese noch stattfinden kann, liegt zwischen 36 und 45°C, beim Ölbaum bei 48°C. An der Waldgrenze haben Bäume ein tieferes Optimum als in Tieflagen. Innerhalb einer Art kann die Anpassung an ein Optimum genetisch fixiert sein: bei Hochlagenherkünften liegt die optimale Temperatur meist tiefer als bei Tieflagenherkünften. Mit zunehmender Beleuchtungsstärke steigt der Optimalbereich deutlich an (bei der Fichte: 12°C bei 3'000 lx / 17°C bei 30'000 lx), was darauf hinweist, dass sich die Pflanze an den jährlichen Verlauf der Klimaverhältnisse anpasst.

Kohlendioxid: Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft (derzeit 0.035 Vol.-%, oder 345 ppm) ist für die Photosynthese ein limitierender Faktor: diese fällt und steigt unterhalb und oberhalb des natürlichen CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Luft annähernd proportional zu diesem. Der Kompensationspunkt (Nettphotosynthese = 0) liegt bei ca. 50 ppm (rund 15% des Grundgehaltes). Die maximale Nettphotosynthese wird erst beim 5fachen (Fichte und Tanne), 8 fachen (Buche und Waldföhre) und 10fachen (Pappel) der Normalkonzentration erreicht. Bei einem zu erwartenden weiteren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft (1850: 290 ppm; 1988: 330 ppm; jährliche Zunahme um 0.7 ppm infolge Verbrennung fossiler Brennstoffe) wird die photosynthetische Leistung der Bäume und Wälder zunehmen.

Wasser: Bei trockener Luft ist die CO<sub>2</sub>-Aufnahme reduziert. Bei 30-40% rel. Luftfeuchte liegt die Photosynthese der Lärchen auf der Hälfte des Wertes bei wasserdampfgesättigter Luft. Mit 25% rel. Luftfeuchtigkeit bricht sie bei Fichten zusammen. Dies hängt mit einem entsprechenden Verschluss der Stomata zusammen. Bei Fichte und Tanne ist die Photosynthese nicht bei wassergesättigtem Böden maximal, sondern leicht unter der Feldkapazität (bei entwässerten Grobporen). Andere Arten hingegen (z.B. die japanische *Cryptomeria*) weisen selbst bei Staunässe maximale Leistungen auf. Mit Abnahme der Bodenfeuchtigkeit bis zum permanenten Welkepunkt (wo für die Wurzeln kein Wasser mehr verfügbar ist) fällt die Photosynthese progressiv gegen Null.

Wind: Schon bei Windgeschwindigkeiten von 3-5 m/s (mit Böen von 10 m/s) betrug die Photosynthese von Blättern eines Pappelbestandes nur noch 20% des Wertes bei einem windstillen Tag (0.5 - 1.0 m/s). Die Arve scheint weniger empfindlich zu sein (75% bei 20 m/s). Die Herabsetzung der CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch den Wind wird zum Teil durch den Spaltenschluss, zum Teil durch das Zusammenlegen der Blätter / Nadeln in Windrichtung mit geringerem Lichtgenuss erklärt.

Innere Faktoren: Bei Wasserdefizit der Blätter (Wasserabgabe > Wasseraufnahme) werden durch den Verschluss der Stomata Transpiration und CO<sub>2</sub>-Aufnahme eingeschränkt. Bei der Birke wird der Nullpunkt des CO<sub>2</sub>-Gaswechsels schon bei einem Defizit von 12.5% des Blattfrischgewichtes erreicht.

Auch der Chlorophyll- und Nährstoffgehalt der Blätter spielt für die Photosyntheserate eine wichtige Rolle. Mit zunehmendem Stickstoff- und Eisengehalt von Pappelblättern wird eine Zunahme des Chlorophyllgehaltes und der Photosynthese beobachtet. In gut ernährten und ausgereiften Blättern ist Chlorophyll meist im Überschuss vorhanden: erst unter der Hälfte des Höchstwertes fängt die Photosyntheseintensität an, abzunehmen. Dies ist der Fall bei der Vergilbung im Herbst, bei Mineralstoffmangel oder nach Einwirkung schädigender Gase.

Zudem wird festgestellt, dass im Laufe der Entwicklung sommergrüner Blätter und mit der Alterung mehrjähriger immergrüner Blätter und Nadeln sich das Photosynthesevermögen ändert. Bei einer Tannenart beträgt z.B. der Abfall von 0- zu 7jährigen Nadeln etwa 50%: ältere Nadeln tragen also noch erheblich zum C-Gewinn des Baumes bei.

Die Leistungsfähigkeit der Photosynthese ist nach Baumarten unterschiedlich. Voll entwickelte Blätter / Nadeln unter optimalen Bedingungen fixieren maximal zwischen 3 mg CO<sub>2</sub> / g Trockengewicht / Stunde (Fichte, Arve) und 15 mg (Lärche, Buche). Werden aber die jährlichen Perioden positiver CO<sub>2</sub>-Tagesbilanzen und die Blattmassen der Bestände und ihr Ersatz berücksichtigt, so ergibt sich für die Fichte ein fast doppelt so grosser C-Gewinn je ha und Jahr als für die Buche. In diesem Sinn ist auch die jährliche Assimilation einer 70 Jahre alten Arve an der Waldgrenze mit ca. 45 kg CO<sub>2</sub> bedeutend höher als diejenige einer vergleichbaren Lärche (ca. 30 kg CO<sub>2</sub>).

#### Fragen:

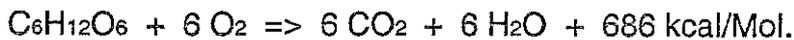
- Wie kann die Photosyntheseleistung waldbaulich optimiert werden?
- Welchen Einfluss hat diese Optimierung auf die Holzeigenschaften?

## Atmung

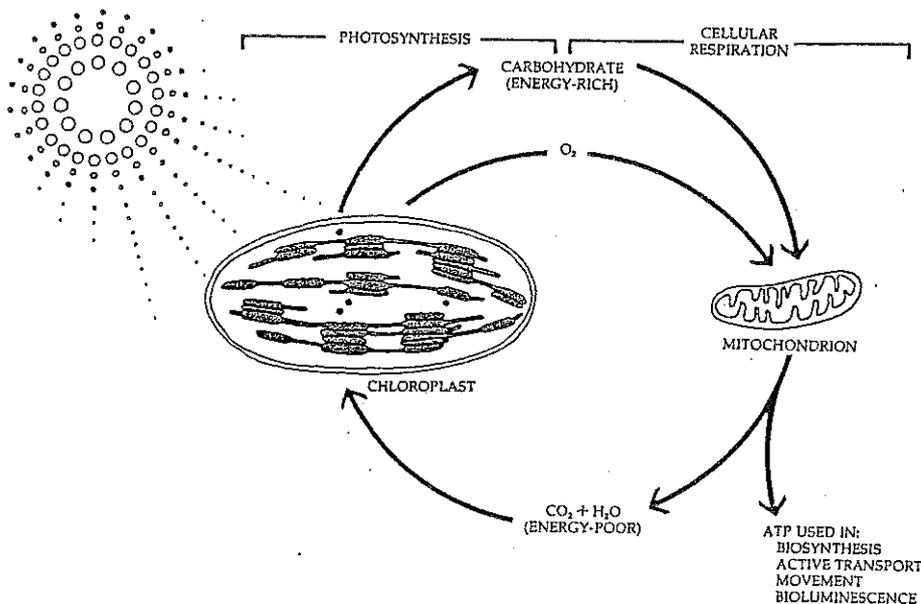
Die Energie für biochemische Umsetzungen im Zellmetabolismus sowie für die Aufrechterhaltung der Struktur wird über Atmungsprozesse geliefert. Die Ausgangssubstanzen dafür werden durch die Photosynthese in Form von energiereichen Zuckern, Stärke, anderen polymeren Kohlehydraten oder Fetten bereitgestellt. Hingegen können die eigentlichen Baustoffe der Pflanzen (Cellulose, Hemicellulosen, Lignin, Pektine, Suberine u.a.) nicht als Energiereserven genutzt werden.

Die Zentren der Energieerzeugung sind die Mitochondrien, Organellen, die in pflanzlichen wie in tierischen Zellen vorkommen. Mitochondrien, sowie auch die pflanzen-spezifischen Chloroplasten, besitzen ein eigenes, ringförmiges Chromosom, wie es für prokaryontische Bakterien typisch ist. Man ist der Auffassung, dass die modernen eukaryontischen Zellen durch ein Weiterleben von prokaryontischen Zellen als Organellen innerhalb von Wirtszellen entstanden sind (Endosymbiontentheorie).

Beim Atmungsvorgang wird Zucker zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert, und eine mit der Photosynthese vergleichbare Menge Energie freigesetzt:



Bei einer stufigen Reaktionskette wird die gewonnene Energie in den Phosphatbindungen von Adenosintriphosphat (ATP) zwischengespeichert. ATP dient als Energiedonator für zahlreiche biochemische Reaktionen, und wird bereits bei der Photosynthese in dieser Funktion genutzt. In Pflanzenzellen findet die Atmung in der Regel ohne Temperaturerhöhung statt.



**Abb.2:** Verhältnis zwischen der zellulären Atmung und der Photosynthese (Raven 1992, S.75)

Die Nettophotosynthese der Blätter am Tag wird durch die Atmung der Blätter während der Nacht verringert, ferner durch die Atmung der Äste und Stämme, der Wurzeln und der Fruktifikationsorgane. Die Jahres-CO<sub>2</sub>-Bilanz (Überschuss an fixiertem CO<sub>2</sub>) wird als Nettoprimärproduktion bezeichnet (verfügbar für Speicherung, Zuwachs und Wachstum). Der Jahreszuwachs an Biomasse (bleibender Zuwachs) ergibt sich aus der Reduktion der Nettoprimärproduktion um den Verlust an Blättern, Ästen, Wurzeln, Fruktifikationsorgane und um den Verlust durch Konsumenten.

Der wichtigste externe Faktor für die Atmung ist die Temperatur. Schon ab ca. -10°C wird Atmung festgestellt (Temperaturminima für Atmung und Photosynthese fallen etwa zusammen). Mit zunehmender Temperatur steigt die Atmungsintensität. Das Temperaturoptimum und Temperaturmaximum der Atmung liegen in der Regel höher als die der Brutto- und Nettophotosynthese. Die Blätter der Laubbäume atmen stärker als die Nadeln der Coniferen; Lichtbaumarten stärker als Schattenbaumarten. In Bezug auf das Blattrockengewicht nimmt die Atmungsintensität in folgender Reihenfolge ab:

Kräuter > Lärche > Laubbölzer > Immergrüne Nadelhölzer

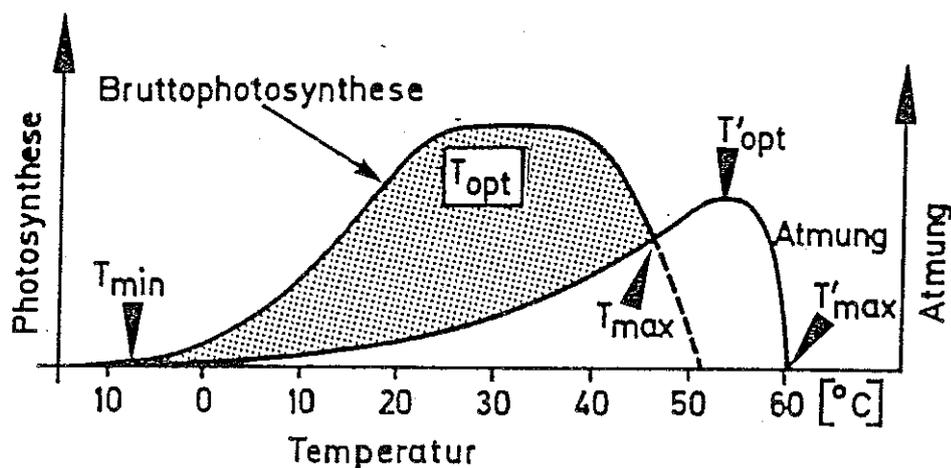
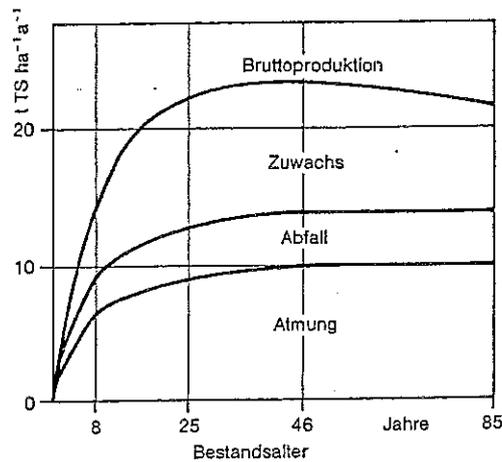


Abb.3: Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit von Atmung und Photosynthese. Die Nettophotosynthese ist durch den punktierten Bereich dargestellt (Larcher 1980, aus Strasburger 1983, S.289)

Der Nachtatmungsanteil nimmt von der Lichtkrone zur Schattenkrone deutlich zu, und steigt bei *Pinus* ebenfalls mit dem Alter der Nadeln. Bei adulten Buchen wird nachts um 14% der Nettoassimilation veratmet.

Die Ast- und Stammatmung (Achsenatmung) spielt im CO<sub>2</sub>-Haushalt der Bäume eine bedeutende Rolle, so wie auch die Wurzelatmung. Die Achsenatmung verringert den Jahresüberschuss an CO<sub>2</sub> um etwa ein Viertel. Im warm-feuchten Klima (tropischer Regenwald) liegt dieser Anteil noch höher. Die Wurzelatmung beträgt zwischen 7% (junge Arven an der Waldgrenze auf kühlen Böden) und über 30% (Föhrenstangenholz in Tief-lage).

Gesamthaft über Buchenbestände von verschiedenem Alter betrachtet, beträgt der Atmungsanteil fast die Hälfte der Bruttproduktion.



**Abb.4:** Bruttoproduktion, Atmung und Abfall sowie der daraus resultierende Biomassenzuwachs bei Buche, in t Trockensubstanz pro ha und Jahr in Dänemark (Möller et al. 1954, aus Lyr et al. 1992, S.254)

**Fragen:**

- Es wird davon ausgegangen, dass bis Mitte Jahrhundert die durchschnittliche Temperatur der Erde zwischen 1° und 6°C zunehmen wird. Welche Auswirkung hat dies auf die Atmungsprozesse?
- Was kann dagegen waldbaulich unternommen werden?

**Saftstrom (Xylemstrom)**

Für eine wirkungsvolle Photosynthese und für die Aufrechterhaltung aller sonstigen Funktionen ist ein ständiger Nachschub von Wasser aus dem Boden erforderlich. Die Produktivität einer Baumart innerhalb ihres Verbreitungsareals hängt in hohem Masse von einer ausgeglichenen Wasserbilanz ab.

Dieser vertikale Strom von Wasser mit gelösten Nährsalzen und organischen Verbindungen (Saftstrom) findet im Xylem (Holz) statt: ein Gewebe, das artspezifisch speziell für die Funktion der Wasserleitung (neben der Stützfunktion und der Speicherfunktion) aufgebaut ist. Die Etappen, Prozesse und Einflussgrößen des Wasserstroms mit bodenbürtigen Substanzen können unter den Aspekten "Wasseraufnahme", "Physiologie des Wassertransportes", "Physik des Wassertransportes" und "Transpiration" dargestellt werden.

Wasseraufnahme:

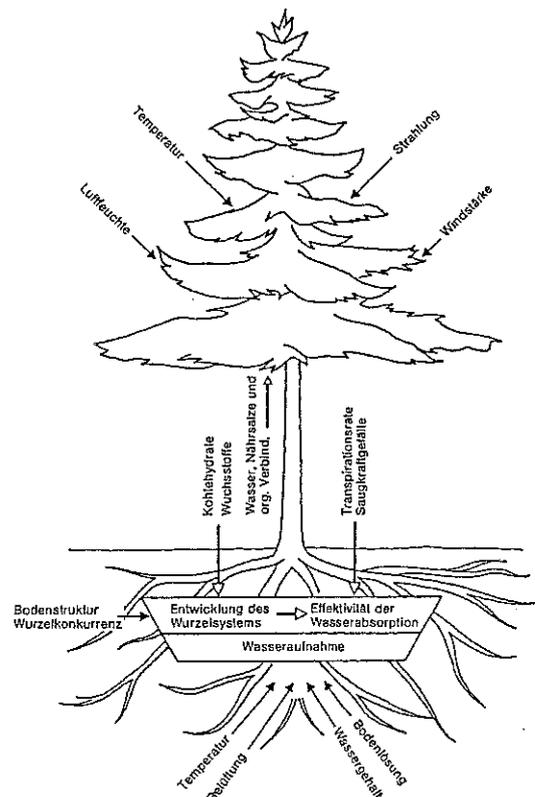
Der grösste Teil der Wasserversorgung (neben einer direkten Aufnahme von Tauwasser durch die Blätter / Nadeln) muss durch das Wurzelsystem sichergestellt werden. Durch ihren Hydro- und Chemotropismus ist die wachsende Wurzel in der Lage, wasser- und nährstoffreiche Schichten für die Pflanze zu erschliessen. Die Wasseraufnahme erfolgt direkt durch die Epidermis junger Wurzeln, durch die oberflächenerweiternden Wurzelhaare und besonders durch die für Waldbäume typischen ektotrophen Mykorrhiza. Diese Pilz-Wurzel-Symbiose in Form eines dichten Mantels um die jungen Wurzelspitzen mit in den Boden ausstrahlenden Hyphen ermöglicht eine Vergrösserung der Wasser- und Mineralsalz-resorbierenden Oberfläche auf das Hundert- oder Tausendfache. Ausserdem ist die Atmung der Mykorrhizen etwa doppelt so hoch wie diejenige normaler Wurzeln,

wodurch die aktive Ionenaufnahme verbessert wird. Es wurde eine gesteigerte Aufnahme von Stickstoff, Kalium, Magnesium, und Phosphat, auch über eine gewisse Entfernung von den Wurzeln festgestellt, sowie auch von Eisen und anderen Mikronährstoffen.

Die Ionenaufnahme erfolgt selektiv: die Aufnahmerate der Hauptnährelemente N, P und K ist höher, als es dem Massenfluss entspricht; Na und Cl werden hingegen diskriminiert.

Wenn die Transpiration (der Hauptfaktor der Wasserbewegung durch den Pflanzenkörper) schwach oder noch nicht wirksam ist, z.B. nachts oder vor der Laubentfaltung im Frühling, wird der nötige Wasserpotential-Gradient durch die Sekretion von Ionen in das Wurzelxylem hergestellt. Durch Osmose fließt das umgebende Wasser in das Xylem. Es entsteht ein positiver Wurzeldruck, der Wasser und gelöste Substanzen den Stamm hinaufpresst. Dieser Prozess spielt wahrscheinlich eine Rolle bei der Versorgung der austreibenden Knospen mit Nährstoffen. Der Xylemsaft ist im Frühjahr besonders angereichert durch mobilisierte Zuckerverbindungen aus dem letztjährigen Assimilatstrom. Das Anzapfen dieses Saftes beim Zuckerahorn (*Acer saccharum*; *A. nigrum*) mit durchschnittlich 2.5% Zuckergehalt, hat in Nordamerika zur gewerblichen Produktion von *Maple syrup* nach indianischer Tradition geführt.

Die Wasseraufnahme durch das Wurzelsystem und die Leitung in die Krone geschieht unter einem Wasserpotentialgefälle im Kontinuum Boden-Pflanze-Atmosphäre. Externe Faktoren beeinflussen dabei einerseits das Wurzelsystem (Wurzelkonkurrenz, Bodenstruktur, Temperatur, Belüftung, Wassergehalt, Bodenlösung), andererseits die Krone (Strahlung, Temperatur, Luftfeuchte, Windstärke). Die Effektivität der Krone hängt von den zugeführten Substanzen (Wasser, Nährsalze, organische Verbindungen) ab. Die Entwicklung des Wurzelsystems wird durch zugeführte Kohlehydrate und Wachstumsstoffe bestimmt. Im Zusammenhang damit steht die Effektivität der Wasserabsorption und global die Wasseraufnahme. Letztere wird durch die Transpirationsrate und das Saugkraftgefälle (Ausgleich zwischen Lösungspotential des Wassers und entgegengesetztem Druckpotential der Gewebe) reguliert.



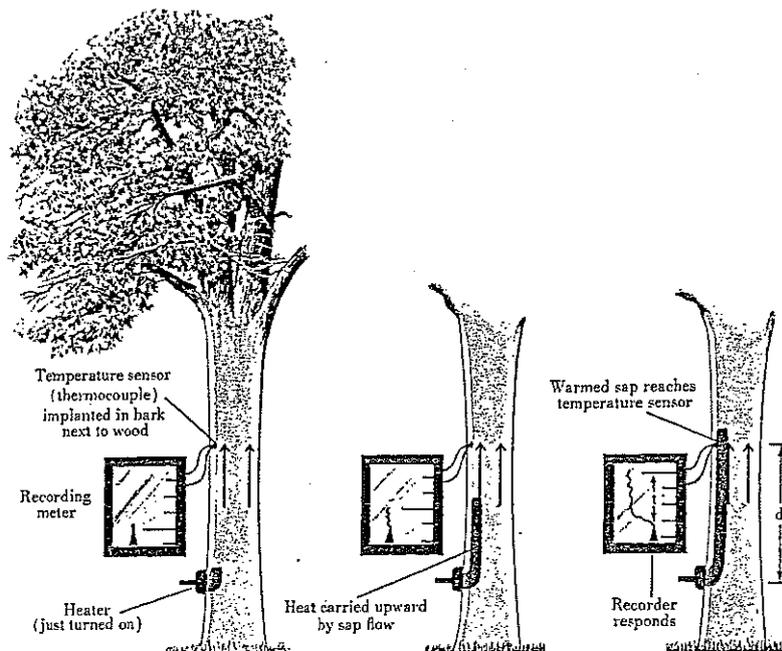
**Abb.5:** Schematische Darstellung der die Wasseraufnahme beeinflussenden Faktoren (Lyr et al. 1992, S.147)

## Physiologie des Wassertransportes:

Der aufwärtsgerichtete Wasserstrom findet im peripheren Splintbereich statt. Bei Nadelhölzern beträgt diese Zone bis zu 60 Jahrringe, bei zerstreutporigen Laubhölzern ca. 20 Jahrringe (10% der Wassermenge fließt im letzten Jahrring), bei ringporigen Laubhölzern sind es i.d.R. weniger als 10 Jahrringe, mit bis zu 75% der Wasserleitung im letzten Zuwachsring.

Das Wasser fließt somit nur im Xylembereich, wo noch lebende Parenchymzellen vorhanden sind. Zwischen Splint und Kern ist eine progressiv fortschreitende Umwandlungszone vorhanden, wo eine Inaktivierung der Leitbahnen stattfindet: bei Nadelhölzern werden die Tracheiden durch einen Hoftüpfelverschluss blockiert, bei Laubhölzern werden die Gefäße durch Thyllenbildung oder durch Gummieinlagerung verstopft.

Mit Hilfe einer thermoelektrischen Methode ist es möglich, die Geschwindigkeit des Saftstroms in einer intakten Pflanze zu ermitteln. Dies geschieht durch eine laufende Temperaturentnahme mit einer Xylemsonde in einem bestimmten Abstand von einer lokalen Wärmequelle.



**Abb.6:** Messung der Geschwindigkeit des Saftstromes im Baum mittels "Hitze-Puls-Methode" (Ray 1972, S.84)

Allgemein wird festgestellt, dass die Geschwindigkeit des Transpirationsstromes mittags ein Maximum aufweist und dass sie im Stamm grösser ist als in den Ästen. Ein genauer Vergleich zeigt, dass am Vormittag der Saft zuerst in den Zweigen (in der Nähe der transpirierenden Blätter) zu fließen beginnt, und erst später im Stamm; gegen abend ist eine gleiche Verzögerung an der Abnahme des Flusses feststellbar. Gleichzeitig sind schwache, reversible Variationen des Durchmessers (anhand von Dendrometermessungen) mit basipetalem Verlauf ermittelt worden. In dieser Hinsicht wird von einer saugenden Wirkung der Transpiration gesprochen.

Die mittäglichen Spitzengeschwindigkeiten des Transpirationsstromes sind nach Pflanzentypen unterschiedlich. In Pflanzen mit Tracheiden (Nadelhölzer) und mit kleinen Gefässen sind die Werte tiefer als in Pflanzen mit grossen Gefässen (ringporige Laubhölzer, Lianen); bei immergrünen Gewächsen niedriger als bei sommergrünen.

Pflanzentyp	Saftstromgeschwindigkeit (m/h)
Moose	1.2 - 2.0
Nadelhölzer, immergrün	1.2
Lärche	1.4
Mediterrane Hartlaubgewächse	0.4 - 1.5
Sommergrüne zerstreutporige Laubh.	1 - 6
Ringporige Laubhölzer	4 - 44
Krautige Pflanzen	10 - 60
Lianen	150

(nach Huber 1956, aus Zimmermann 1983, Xylem Structure and the Ascent of Sap)

In funktioneller Hinsicht wird für die Gefässsysteme im Lauf der Evolution der Pflanzen (Phylogenie) ein allgemeiner Trend festgestellt: primitive Pflanzen besitzen sichere Systeme mit beschränkter Leistungsfähigkeit, modernere funktionieren mit leistungsfähigen, allerdings weniger robusten Systemen. Im Laufe dieser Entwicklung findet z.B. bei Laubhölzern eine Reduktion der Gefässgliedlänge und eine Zunahme des Gefässdurchmessers, eine progressive Querstellung der Endwände, eine Vereinfachung der Durchbrechungen und eine Modifikation der intervaskularen Tüpfelung statt. Schon im Lauf der Entwicklung des Einzelbaumes (Ontogenie) sind diese Tendenzen andeutungsweise feststellbar.

#### Merkmale ursprünglicher Gefässe

- Langgestreckte, englumige Zellen
- langgezogene, überlappende Endwände
- leiterförmige Gefässdurchbrechungen
- intervaskuläre Tüpfelung leiterförmig

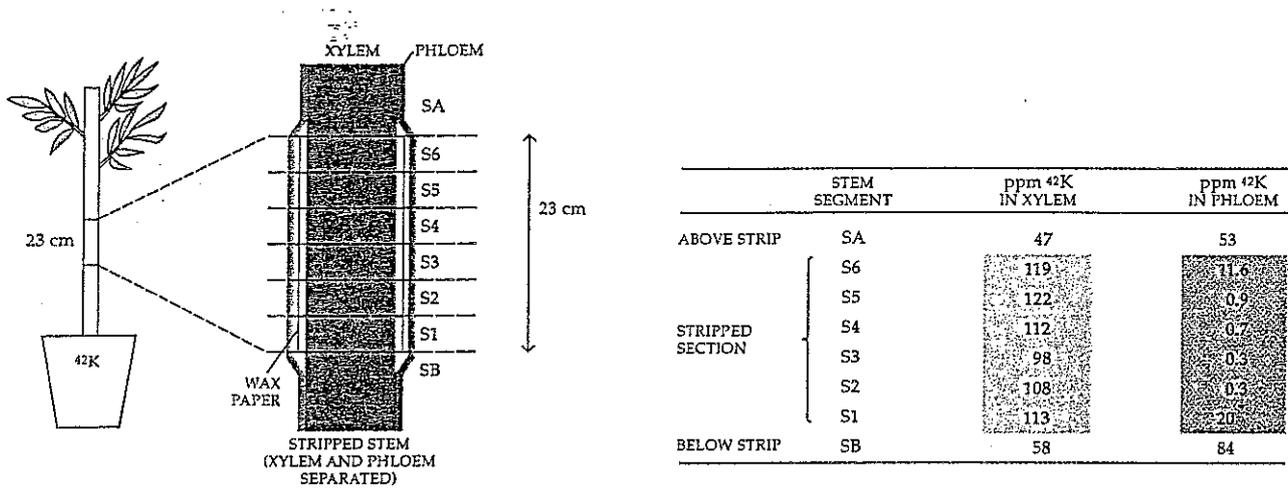
#### Merkmale hochentwickelter Gefässe

- kurze, weittumige Zellen
- horizontal liegende Endwände
- einfache Gefässdurchbrechungen
- intervaskuläre Tüpfelung alternierend



**Abb.7:** Phylogenie des Gefässsystems im Laubholz  
(Bailey 1954, Contributions to Plant Anatomy.  
Chronica Botanica Company, Waltham)

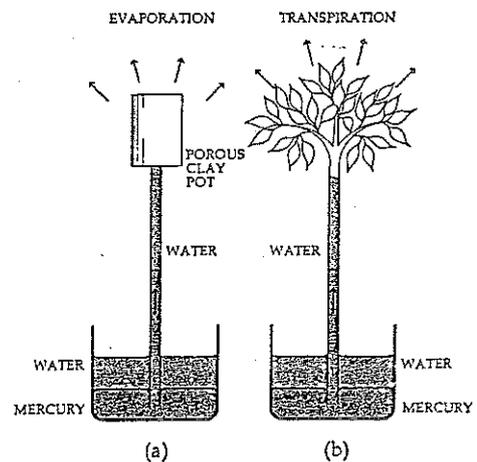
Der Wassertransport besitzt neben der vertikalen auch eine horizontale Komponente, welche vermutlich über das Markstrahlensystem das Kambium und das Phloem direkt versorgt. Ein Experiment mit einer verholzten Pflanze, wo eine undurchlässige Schicht zwischen Holz und Bast plazierte wurde, und welche mit Radio-Isotop-angereichertem Wasser versorgt wurde, verdeutlicht dies.



**Abb.8:** Untersuchung des Weges des Wassers mit anorganischen Ionen (markiert mit radioaktivem Kalium) in einer verholzten Pflanze (Raven 1992, S.621)

Physik des Wassertransportes:

Mit einer einfachen Vorrichtung kann gezeigt werden, dass das Wasser vor allem auf Grund einer Saugspannung in die Krone geführt wird. Ein mit Wasser gefülltes, poröses Tongefäß wird mit einem langen, dünnen, ebenfalls wassergefüllten Glasrohr verbunden, welches am unteren Ende in ein Quecksilbergefäß eingetaucht ist. Das Wasser verdunstet an der Oberfläche des Tontopfes und wird durch „hinaufgezogenes“ Wasser ersetzt, was sich an der steigenden Hg-Säule zeigt. Die Transpiration des Blattwerkes eines analog verbundenen Zweiges erzeugt einen ähnlichen Aufwärtsstrom.

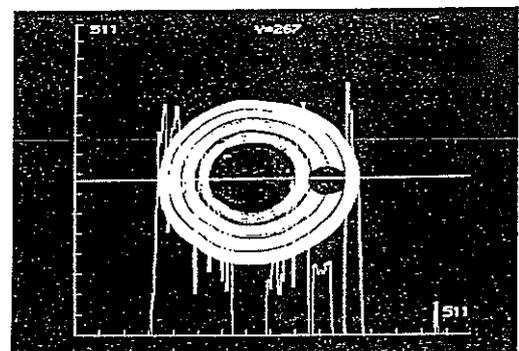
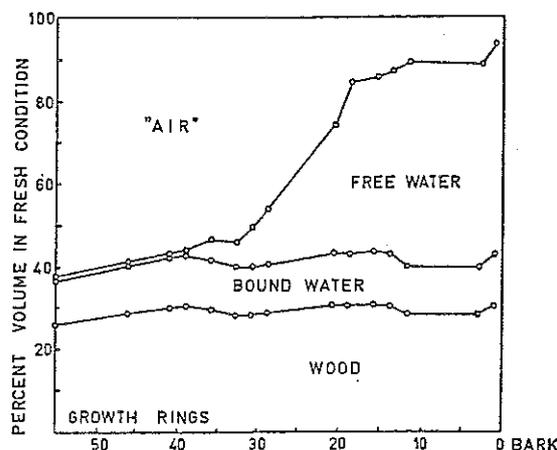


**Abb.9:** Demonstration eines Aspektes der Kohäsion-Saugspannungs-Theorie (Raven 1992, S. 622)

Mit einer solchen Installation ist es aber unmöglich, gewöhnliches Wasser in Höhen von bis zu über 100 m zu transportieren, wie es in den grössten Bäumen geschieht. Die Physik lehrt nämlich, dass mit einer Saugpumpe Wasser nur auf eine Höhe gepumpt werden kann, die dem Atmosphärendruck entspricht, d.h. etwa 10 m auf Meeresniveau. Der schon erwähnte temporäre Wurzeldruck kann hier nicht als ergänzende Komponente gelten, weil er gerade bei transpirationsintensiven Zeiten praktisch ausfällt. Ein Beitrag wird durch die Tatsache geleistet, dass das Wasser im Stammkörper durch ein System von Kapillaren fliesst. In Kapillaren ist die Aufstieghöhe invers proportional zum Durchmesser. Allerdings ist diese Komponente von beschränktem Ausmass: in einem Gefäss von 300 µm Durchmesser ergibt dies lediglich eine Steighöhe von 10 cm; für die engeren Tracheiden (30 µm Durchmesser) erhält man 100 cm. Die Zellwände an sich, mit ihren interfibrillären Poren von 2 bis 200 nm (Nanometer) könnten Steighöhen von 150 m und darüber erklären, jedoch mit enormem Fließwiderstand.

Ein Element der Problemlösung besteht in der Kohäsionskraft des Wassers, die erst im Blasen- und keimfreien Zustand voll zur Geltung kommt, wo kein inneres Sieden mehr stattfinden kann. Dann ist es für die zusammenhängenden Wasserfäden möglich; weit über 10 m ihre Kontinuität aufrechtzuerhalten (die berechnete maximale molekulare Kohäsion von Wasser beträgt ca. 1500 bar). Dadurch ist die bei 100 m Baumhöhe experimentell bestimmte Wasserspannung (negativer Druck) von -20 bar physikalisch realisierbar.

Auf anatomischer Ebene verhindert der Baum die kumulative Blasenbildung mit Hilfe der Hoftüpfel der Tracheiden oder mit den leiterförmigen Gefässdurchbrechungen. Bei den höchsten Nadelbäumen sollten die Poren der Tüpfelmembranen 100 nm nicht überschreiten. Grössere Gefässe bei ringporigen Laubböhlzern sind in der Regel durch Tracheiden begleitet, die im Fall von Embolie (Kavitation) die Wasserleitung allein aufrechterhalten (bei jedoch tieferen Geschwindigkeiten). Dass die Wasserleitung sich auf die Peripherie des Splintes konzentriert, erklärt sich dadurch, dass im Lauf des sekundären Dickenwachstums immer wieder neue, blasenfreie Leitelemente durch das Kambium gebildet werden. Gegen innen ist die progressive Abnahme des Lumen-füllenden „Freien Wassers“ und Zunahme des Luftanteils (der Embolien) artspezifisch feststellbar.



**Abb.10:** Verteilung von freiem Wasser, gebundenem Wasser, Zellwandsubstanz und Luft auf einem Radius von Fichte (links) (Zimmermann 1983, S.96). Verteilung des freien Wassers und der Luft im Querschnitt einer jungen Fichte (rechts) (Kern-Spin-Tomographie-Aufnahme, PHW ETH)

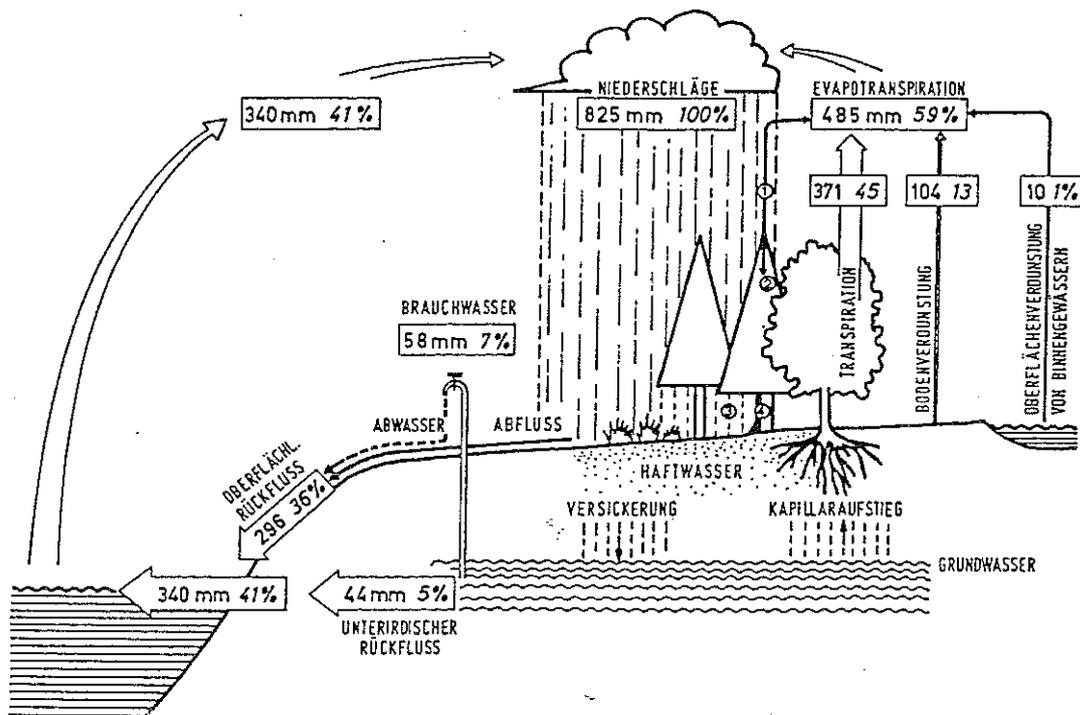
Dies sind einige physikalische Erklärungsversuche, die jedoch nicht für alle Erscheinungen hinreichen. Zum Beispiel bei den Palmen, Monokotyledonen ohne sekundäres Dickenwachstum, und daher ohne Neubildung von ganzen Gefäßbahnen, dürfen ebenfalls keine Embolien die Wasserfäden abreißen lassen. Es ist noch nicht bekannt, durch welchen Prozess Embolien in Leitbahnen verhindert werden, die während mehreren Jahrzehnten funktionieren müssen, oder wie eventuell entstandene Gasblasen wieder aktiv entfernt werden.

Transpiration:

Unter Transpiration wird der Wasserdampfverlust durch oberirdische Pflanzenteile verstanden. Neben der direkten Verdunstung (Evaporation) von Wasser durch die Bodenoberfläche bezeichnet die Evapotranspiration die Gesamtverdunstung einer mit Pflanzen bedeckten Bodenfläche.

Für Deutschland gemessene und berechnete Werte (als Beispiel für die gemässigte Klimazone) zeigen, dass das durch die Niederschläge dem Gebiet zugeführte Wasser (825 mm pro Jahr = 100%) aus der Meeresverdunstung (41%) und aus der Landschaftsverdunstung (Evapotranspiration 59%) stammt.

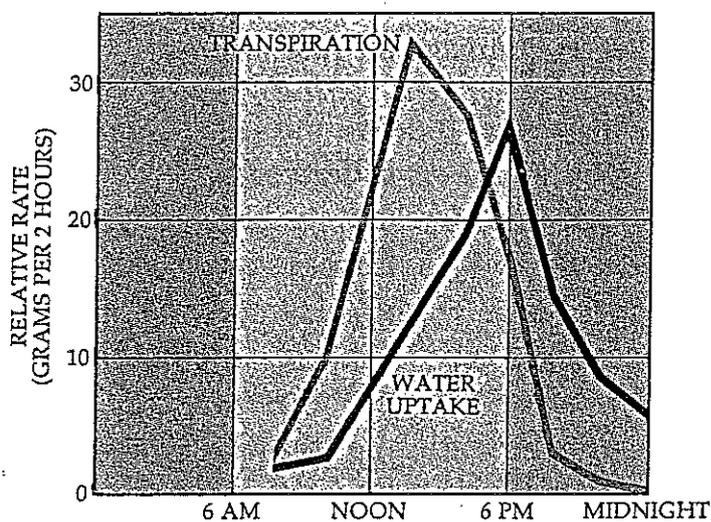
Die Evapotranspiration selber besteht aus der Bodenverdunstung (13%), aus der Oberflächenverdunstung von Binnengewässern (1%) und vor allem aus der Transpiration der zu ca. einem Drittel bewaldeten Pflanzendecke (45% - d.h. 3/4 der Evapotransp.).



**Abb.11:** Schema des Wasserkreislaufes unter zentraleuropäischen Verhältnissen. Jahreswerte in mm und prozentuellen Anteilen. Flächennutzung: 57% Landwirtschaft, 28% Wald, 15% verbaut oder nicht genutzt (Strasb. 1983)

Von der Gesamtmenge des durch die Wurzeln aufgenommenen Wassers werden etwa 99% in Form von Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben. Der Hauptteil davon (über 90 %) findet den Weg durch den Blattinternen Luftraum (15 - 40% des Blattvolumens) und durch die Spaltöffnungen (1 - 3 % der Blattoberfläche); der Rest entweicht durch die Cuticula und durch die Rinde und ihre Lentizellen.

Wie schon erwähnt, wird die Transpiration als eine wichtige Treibkraft für die Wasseraufnahme durch die Wurzeln angesehen. Der im Interzellularräum der Blätter abgegebene Wasserdampf verursacht ein Ungleichgewicht im Wasserpotential der Mesophylzellen (Blattmittelschicht), dadurch einen "Sog" im Xylem der Leitbündel und des Splintes der Ast- und Stammstruktur. Somit wird das Wasserpotential der Wurzeln reduziert, was ihre Kapazität erhöht, Wasser aus dem Boden zu extrahieren. Das Kontinuum "Boden-Pflanze-Atmosphäre" zeigt wegen der messbaren Elastizität des Stammkörpers eine Art Peristaltik, mit zeitlicher Verschiebung zwischen der Transpiration und der Wasseraufnahme.



**Abb.12:** Die Transpiration ist der Wasseraufnahme vorgelagert (Messungen auf Esche, *Fraxinus*) (Raven 1992, S. 621)

Neben dem allgemeinen Tagesgang (nach Stunde, Bewölkungsgrad / Luftfeuchtigkeit / Wind) und dem Jahresgang wird bei der Transpiration eine artspezifische Komponente festgestellt. Die Baumarten unterscheiden sich nämlich in ihrer hydraulischen Architektur (das funktionale Wasserleitsystem), in ihrer Möglichkeit, Licht- und Schattenblätter zu bilden und in der räumlichen Verteilung des Laubes, sei dies genetisch (unterschiedliche Provenienzen) oder phänotypisch (an einen bestimmten Standort angepasst) bedingt.

Auch unter einheitlichen Bedingungen sind erhebliche Differenzen bei der durchschnittlichen Transpiration der wichtigsten forstlichen Baumarten vorhanden. Dabei transpirieren die Laubbäume mehr als die Nadelbäume, wobei die sommergrüne Lärche eine Mittelstellung zwischen den beiden Gruppen einnimmt. Innerhalb der beiden Gruppen verdunsten die Lichtbaumarten (Birke, Eiche, Föhre) deutlich mehr als die Schattenbaumarten (Buche, Fichte, Douglasie). Ein Beispiel in Zahlen: Bei warmem Wetter gibt eine Sonnenblume täglich 1 - 2 l Wasser an die Atmosphäre ab, eine adulte Birke etwa 50 l und eine Hektare Buchenwald 30'000 l.

	$\text{g H}_2\text{O dm}^{-2} \text{d}^{-1}$	$\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{FG d}^{-1}$
Birke	8,48	9,50
Eiche	5,02	6,02
Buche	3,12	4,83
Lärche	3,60	3,24
Kiefer	3,42	1,88
Fichte	2,53	1,39
Douglasie	2,20	1,33

**Abb.13:** Mittlere Tagessummen der Transpiration (Juni bis August) von 7 - 8jährigen Forstpflanzen in Tharandt, bezogen auf die Oberfläche und das Frischgewicht der Blätter. (nach Polster 1950, aus Lyr et al. 1992, S.180)

Wichtig ist die Hochrechnung der spezifischen Transpiration verschiedener Baumarten auf ganze Bestände, gekoppelt mit einem Bezug auf die Bodenoberfläche und ausgedrückt in mm ( $\text{l m}^{-2}$ ). Der Unterschied der spezifischen Transpiration bei Laub- und Nadelbäumen wird bei der Bestandestranspiration weitgehend ausgeglichen: pro Jahr transpiriert ein Bestand des Alters von Abb. 13 bei Birke um 450 mm, bei Buche um 350 mm, bei Lärche um 520 mm, bei Waldföhre um 270 mm, bei Fichte um 420 mm und bei Douglasie um 530 mm.

Der Grund dafür ist, dass die Laubbäume im Waldgefüge bedeutend weniger Laubmasse bilden als die Nadelbäume. Im Bestand ist deshalb die Transpiration der Fichte fast gleich hoch wie diejenige der Birke, und der Maximalwert wird von der Douglasie erreicht, die sonst pro g Nadeln am wenigsten Wasser abgibt.

Für die Transpirationsphysiologie des Einzelbaumes ist es interessant, zwischen Licht- und Schattenkrone zu differenzieren, um z.B. die Besetzung des Bestandesraums durch eine Art zu verstehen, oder um die Auswirkung einer Grünastung abschätzen zu können. Es zeigt sich, dass der Hauptwasserverbrauch in der Lichtkrone stattfindet (bis zum Fünffachen des Verbrauchs in der Schattenkrone). Bei der Buche als Schattenbaumart ist diese Diskrepanz weniger ausgeprägt. Die unterschiedliche Transpiration ist nicht auf eine unterschiedliche Blattmasse zurückzuführen, sondern auf transpirationsphysiologische und externe Faktoren.

		Transpiration	Blatt-Trocken-	Transpiration	Stammzahl	Transpiration
		g H <sub>2</sub> O g <sup>-1</sup> TG Blatt	gewicht pro	kg H <sub>2</sub> O pro Baum	pro ha	des Bestandes
			Baum in g			in mm
Douglasie	Lichtkrone	599	3270	1959	2070	490
	Schattenkrone	144	2840	409		
	Gesamt		6110	2368		
Kiefer	Lichtkrone	1115	2100	2342	1580	480
	Schattenkrone	301	2310	695		
	Gesamt		4410	3037		
Buche	Lichtkrone	2642	770	2034	1580	601
	Schattenkrone	1624	890	1445		
	Unterkrone	528	610	322		
	Gesamt		2270	3801		
Birke	Lichtkrone	2550	1730	4420	800	425
	Schattenkrone	715	1240	887		
	Gesamt		2970	5307		

**Abb.14:** Jährliche Transpiration von 21jährigen, 14 m hohen Beständen im Schwarzwald (nach Künstle und Mitscherlich 1977, aus Lyr et al. 1992, S.188)

Die Transpiration ist ein wesentliches Glied in der Kette der physiologischen Prozesse. Daher ist ihr Verhältnis zur Substanzbildung der Pflanze, insbesondere zur Holzbildung bei Bäumen von Bedeutung. Als Mass für die "Produktivität der Transpiration" wurde deshalb der Transpirationskoeffizient eingeführt. Dieser Begriff bezeichnet das Verhältnis zwischen verbrauchter Wassermenge (Liter) durch die Pflanze oder den Pflanzenbestand während der Vegetationsperiode und der erzeugten Trockensubstanz (kg). Der Wasserbedarf pro Einheit gebildeter Trockenmasse ist bei verschiedenen Pflanzentypen, Arten und Sorten ungleich gross und sehr vom Entwicklungszustand, der Bestandesdichte und den Umweltbedingungen abhängig. Generell sind in dieser Hinsicht verholzende Pflanzen effizienter als krautige Pflanzen, Nadelbäume effizienter als Laubbäume, besonders als solche tropischer Regionen. Am effizientesten sind die Sukkulente mit dem sog. CAM (Crassulacean Acid Metabolism), die fähig sind, nächtlich CO<sub>2</sub> aufzunehmen (CO<sub>2</sub> - Dunkelfixierung) und daher am Tag auch bei geschlossenen Spaltöffnungen Photosynthese betreiben zu können. Ebenfalls zeigen die tropischen Monokotyledonen des C<sub>4</sub>-Typs (z.B. Mais, Zuckerrohr, Hirse) ein günstigeres Verhältnis als die übrigen C<sub>3</sub>-Pflanzen (die ihren ersten CO<sub>2</sub>-Fixierungsschritt in zwei C<sub>3</sub>-Moleküle [Phosphoglycerinsäure] einmünden lassen). Die C<sub>4</sub>-Pflanzen können nämlich noch bei einer 10mal geringeren CO<sub>2</sub>-Konzentration Photosynthese durchführen, somit auch bei hoher Lichtintensität, ohne dass das Kohlendioxid zum limitierenden Faktor wird.

<b>Krautige C<sub>3</sub>-Pflanzen</b>	
Getreide	500–650
Leguminosen	700–800
Kartoffeln und Rüben	400–650
Sonnenblumen jung	280
Sonnenblumen blühend	670
<b>Holzpflanzen</b>	
Tropische Laubbäume (Nutzpflanzen)	600–900
Laubbäume der gemäßigten Zone	200–350
Nadelbäume	200–300
Ölpalmen	um 300
<b>C<sub>4</sub>-Pflanzen</b>	220–350
<b>CAM-Pflanzen</b>	50–150

**Abb.15:** Durchschnittliche Transpirationskoeffizienten der Produktivität, in Liter transpiriertes Wasser pro Kg erzeugte Trockensubstanz (nach div. Autoren, aus Larcher 1980, S.311)

#### Fragen:

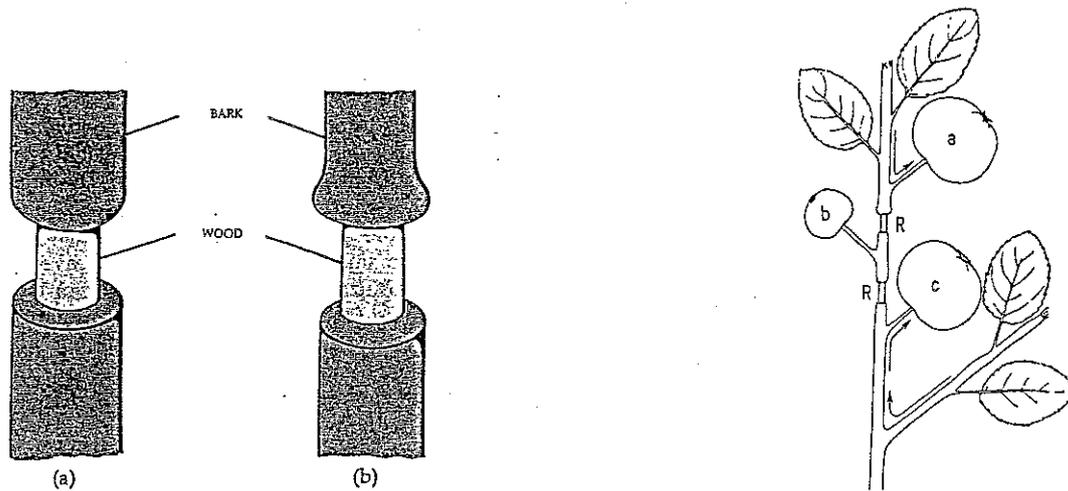
- *Wie wird der aufwärtsgerichtete Wasserfluss (Aufnahme, Transport, Transpiration) durch die Waldbewirtschaftung beeinflusst, im Vergleich mit einem sich selbst überlassenen Bestand?*
- *Es wird geschätzt, dass wenn mehr als 70% eines Ökosystems gestört sind, die noch intakt gebliebenen Teile nicht mehr imstande sind, die Umweltbedingungen für das eigene Überleben aufrechtzuerhalten (Lovelock 1992). Wie könnte dies aus dem Wasserkreislauf begründet werden?*

#### **Assimilatstrom (Phloemstrom)**

Im Gegensatz zum Xylem, das unter anderem als Wassertransportsystem betrachtet wird, gilt das Phloem als Transportsystem für organische Nährstoffe, die im Kronenbereich synthetisiert werden (in chlorophyllhaltigen Zellen der Blätter und z.T. von jungen Trieben - dort im äusseren Bast und in der Markperipherie).

Ein weiterer Unterschied zum Xylem besteht in der Tatsache, dass der Phloemstrom generell stammabwärts (basipetal) fließt. Während der Entfaltungsphase der jungen Triebe fließt er über kurze Distanzen auch aufwärts (akropetal), von den assimilierenden Blättern zu den meristematischen Triebspitzen. Ein akropetales Fließen kann auch bei älteren Triebabschnitten während der Fruchtbildung beobachtet werden.

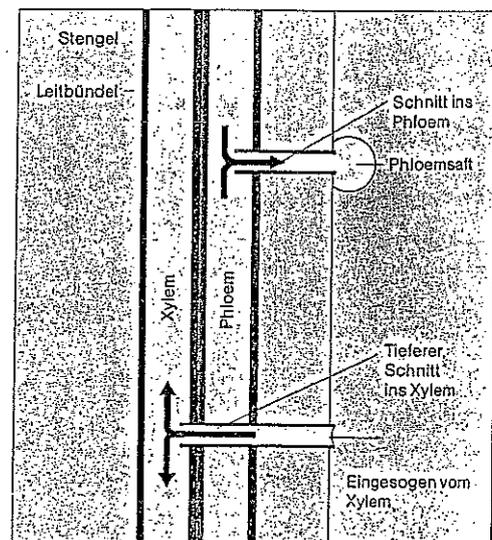
Die Richtung des Phloemstromes lässt sich relativ einfach durch eine Ringelung bis auf die Kambialschicht nachweisen.



**Abb.16:** Experimenteller Nachweis des basipetalen Phloemstroms (links); auf eine Ringelung während der Vegetationszeit reagiert der Baum mit einer einseitigen Kallusbildung (Malpighi, 17.Jhrh) (Raven 1992, S.630). Rechts: der isolierte Apfel *b* kann sich nicht entwickeln, der Apfel *a* wird basipetal ernährt, der Apfel *c* akropetal (nach Münch 1930, in Bosshard 1974, S.131)

Während die wasserleitenden Zellen des Xylems den beträchtlichen Saugspannungen mit Hilfe von dicken Wänden über mehrere Jahre widerstehen müssen, sind die leitenden Zellen des Phloems (Siebelemente: Siebzellen der Nadelhölzer oder Siebröhrenglieder der Laubhölzer) deutlich dünnwandiger, weniger lignifiziert und weicher. Ausserdem handelt es sich um lebende Zellen: beide Zelltypen behalten ihr Cytoplasma, jedoch ohne Zellkern. Schon nach dem ersten Jahr kollabieren sie meistens und verlieren dadurch ihre Funktion.

Im Phloem geschieht der Flüssigkeitstransport im Gegensatz zum Xylem bei Überdruckverhältnissen. Dies lässt sich am passiv quellenden "Honigtautropfen", verursacht durch die Blattläuse, erkennen. Dasselbe lässt sich beobachten wenn, z.B. an einem Stengel von *Ricinus*, ein feiner Schnitt gemacht wird. Es quillt ein Tropfen Phloemsaft heraus. Wird der Schnitt etwas vertieft, bis ins Xylem, zieht der dort herrschende Unterdruck den Saft sofort wieder in die Pflanze hinein.

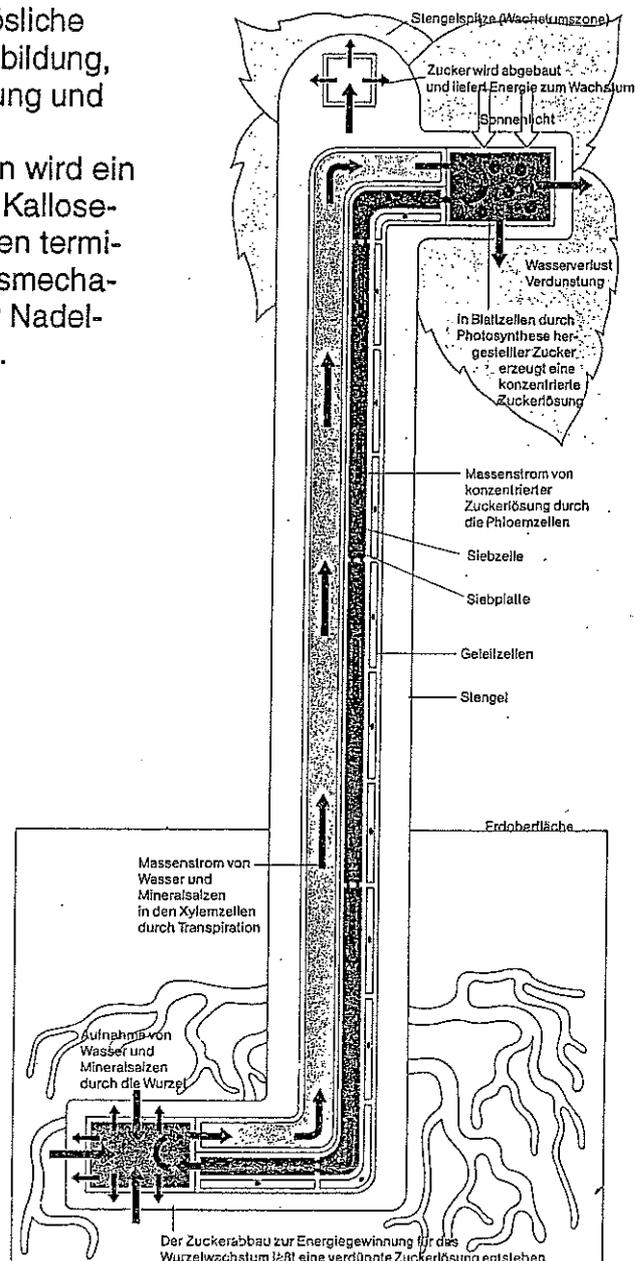


**Abb.17:** Nachweis der Druckverhältnisse im Phloem einer *Ricinus*-Pflanze (Wilkins 1989, S.113)

Der Assimilattransport über lange Distanzen durch den Bast geschieht unter relativ hohen Geschwindigkeiten (um 50 - 100 cm / h). Der entsprechende Prozess wird heute als "Druck-Fluss-Mechanismus" verstanden. Danach werden Assimilate entlang eines osmotisch erzeugten Turgordruck-Gradienten von Quellen (Produktionsorte) zu Senken (Verbraucherorte) geführt. Im Bereich der Quellen wird Zucker (Saccharose) aus der Photosynthese aktiv in die Siebelemente eingelagert. Dadurch wird das Wasserpotential dieser Zellen reduziert und Wasser aus dem Transpirationsstrom angezogen. Dies provoziert einen zu den Senken hin gerichteten Strom mit passivem Nährstofftransport, entlang einer Konzentrationsgradienten. Im Bereich der Senken (wachsende / atmende Organe, speichernde Gewebe) wird Zucker aus den Phloembahnen entzogen. Dadurch steigt ihr Wasserpotential - Wasser strömt hinaus, zum grössten Teil zurück in den Transpirationsstrom. Schon auf dem Weg zwischen Quelle und Senke wird Wasser durch die lebenden Parenchymzellen zwischen Xylem und Phloem aktiv (durch Stoffwechselenergien gespeist) und gezielt aufgenommen und abgegeben.

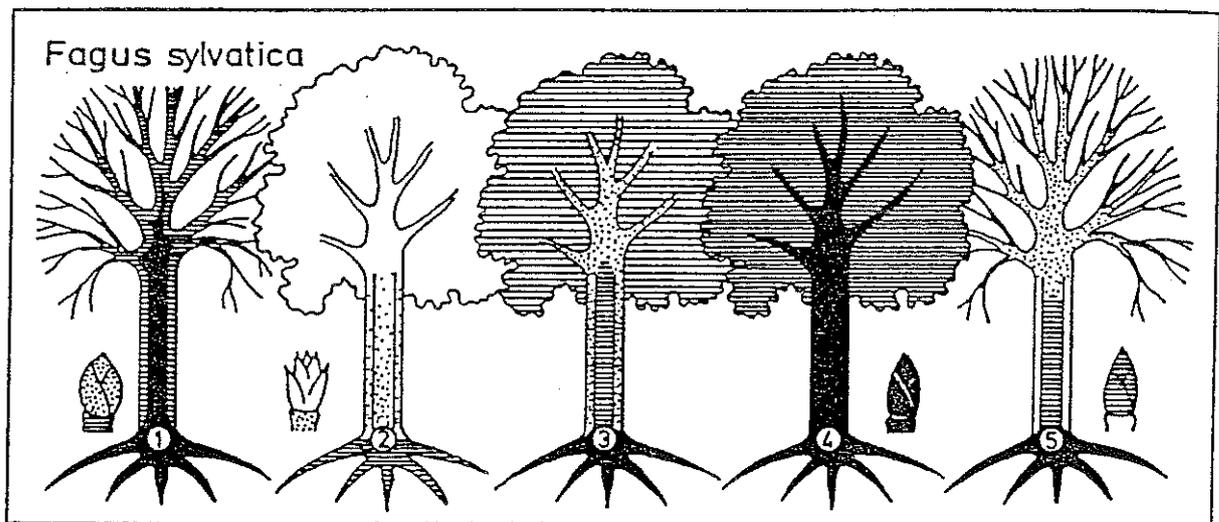
Mengenmässig enthält der Phloensaft 20 - 30% Zucker (vorwiegend Saccharose), als wasserlösliche Verbindungen, die bei der Kronen- und Wurzelbildung, bei der kambialen Tätigkeit, bei der Fortpflanzung und bei der Atmung verwendet werden.

Im Fall einer Verletzung der Phloembahn wird ein Substanzverlust durch eine rasch einsetzende Kalloseablagerung an den lateralen Siebfeldern und den terminalen Siebplatten verhindert. Dieser Verschlussmechanismus entspricht dem Hoftüpfelverschluss der Nadelbäume und der Thyllenbildung der Laubbäume.



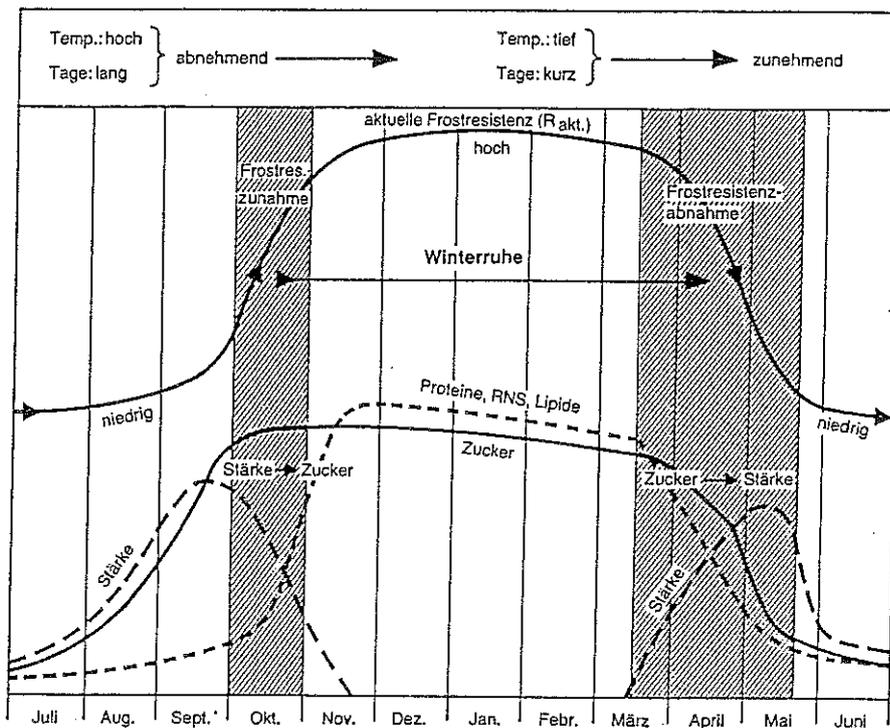
**Abb.18:** Schematische Darstellung des Druck-Fluss-Mechanismus zur Erklärung des Phloemstromes (Wilkins 1989, S.115)

Die Überlebensfähigkeit der Bäume ist, besonders in Zonen mit begrenzter Vegetationszeit, von einem effizienten Speichersystem für die Assimilate abhängig. Den Hauptanteil der Speicherung übernehmen die Strangparenchym- und die Markstrahlsysteme des Xylems und des Phloems, die untereinander und mit dem Wasserleitgewebe räumlich vernetzt sind.



**Abb.19:** Jahreszeitlicher Verlauf der Stärkespeicherung bei der Buche (*Fagus sylvatica*). Maximale Speicherung: schwarz; keine Speicherung oder in Spuren: weiss. 1: Frühjahr unmittelbar vor Laubaustrieb; 2: bei Laubaustrieb; 3: Hochsommer; 4: Herbst vor Laubabwurf; 5: Winter bei kältebedingter reversibler Umwandlung von Stärke in lösliche Kohlenhydrate (nach Fischer 1891, Gäumann 1935 und Kober (unveröff.), aus Larcher 1980, S.180)

Eine wichtige Rolle spielen die Assimilate bei der Ausprägung der Frostresistenz als Vermögen zur Anpassung an die Jahresrhythmik des Klimas winterkalter Gebiete. Nach Eintreten der Kurztagbedingungen mit Temperaturabnahme und hormonellen Veränderungen (z.B. Abscisinsäurezunahme) werden Proteine und RNS synthetisiert, sowie Membranlipide modifiziert. Der zentrale Vorgang, der zur Absenkung der Gefriergrenztemperatur führt, ist die Umwandlung von Speicherstärke in lösliche Kohlenhydrate. Parallel dazu wird eine Wasserverlagerung aus dem Protoplasma in Zellzwischenräume beobachtet.



**Abb.20:** Schematische Übersicht der physiologischen Vorgänge im Zusammenhang mit Erwerb und Verlust der Frostresistenz im Rindengewebe von Robinien (nach Simonovich 1981 und Larcher 1985, in Lyr et al., S.284)

### Fragen:

- Was sind nach funktionalen Kriterien die Unterschiede und die Ähnlichkeiten zwischen Phloemstrom und Xylemstrom? Wie erklären sie sich?
- Was bedeutet für den Wald / für den Baum / für das Holz, die Praxis der Winterfällung im Vergleich zur Sommerfällung?

### Wachstumsregulierung (Phytohormone)

Die Steuerung und Koordination der Differenzierungs- und Wachstumsprozesse auf der Ebene der Zellen, der Gewebe oder der Organe erfolgt zum Teil auf chemischem Wege durch Hormone. Es handelt sich um chemische Botenstoffe, die in extrem geringen Konzentrationen (um ein Millionstel des Pflanzenextraktes und weniger) wirksam sind und bei denen Produktions- und Wirkungsort in der Regel auseinander liegen. Im Bereich des aktiven Kambiums kann die Wirksamkeit auch am Bildungsort festgestellt werden. Im Gegensatz zu vielen tierischen Hormonen sind Phytohormone wenig organ- und wirkungsspezifisch: sie wirken auf viele Organe und üben unterschiedliche Wirkungen aus.

Bei den Phytohormonen werden zwei grosse Kategorien nach der Wirkungsart unterschieden.

**ZUR ANATOMIE****Inhaltsverzeichnis**

Das Ganze und die Teile	2
Zellteilung und funktionelle Einheit	3
Wachstumsgesetze und Stammaufbau	5
Querschnitt eines jungen Sprosses	8
Das Kambium und seine Derivate	9
Der letzte Jahrring eines Nadelholzes	12
Aufbau des Nadelholzes	13
Aufbau des Laubholzes	15
Funktion und Struktur	16
Definitionen	17
Holzeigenschaften abgeleitet von der Anatomie	20
Holzartenliste	21
Zelltypen der Nadelhölzer	23
Zellelemente der Laubhölzer	27
<b>Holzanatomische Übungen</b>	<b>31</b>
Zellarten der Nadelhölzer	33
Zellarten des Laubholzes	41
Merkmale des Stützgewebes	47
Das Leitgewebe bei den Nadelhölzern	48
Schnittrichtungen und Strukturen	53
Holzstrahlen bei Nadelhölzern	59
Das Leitgewebe bei den Laubhölzern	65
Holzstrahlen bei Laubhölzern	74
Tabellen der Mikromerkmale (Ndh & Lbh)	76

## LE TOUT ET LES PARTIES (Interactions)

**Die Pflanzen bilden die Zellen, und nicht die Zellen die Pflanze.**

A. De Bary, 1879.

**... eine Anatomie, die zum Verständnis der Strukturen gelangen will, beginnt mit der Betrachtung der ganzen Pflanze und endet bei der Zelle, die sie als funktionierenden Teil des Ganzen kennenlernt.**

**Eine Synthese zwischen Morphologie und Anatomie wird nur möglich sein, wenn die Begriffssysteme beider Wissenschaften ... so aufgebaut werden, dass sie die Zusammenhänge zwischen der Gestalt und ihrer inneren Organisation durchschaubar machen.**

**Pflanzenmorphologie und Pflanzenanatomie müssen, soll eine sinnvolle Synthese stattfinden, den gleichen Bezugsorganismus haben.**

**Als Individuum oder Elementarorganismus kommt dabei nur die ganze Pflanze in Betracht.**

W. Hagemann, 1982  
Inst. für Systematische Botanik  
und Pflanzengeographie  
Universität Heidelberg

## La division cellulaire:

- compartimentation d'une unité initiale
- étape dans la morphogenèse
- spécialisation ou association en tissus

## Die Zellteilung:

- Unterteilung einer ursprünglichen Einheit
- Schritt in der Gestaltbildung
- Spezialisierung oder Zusammenarbeit in Geweben

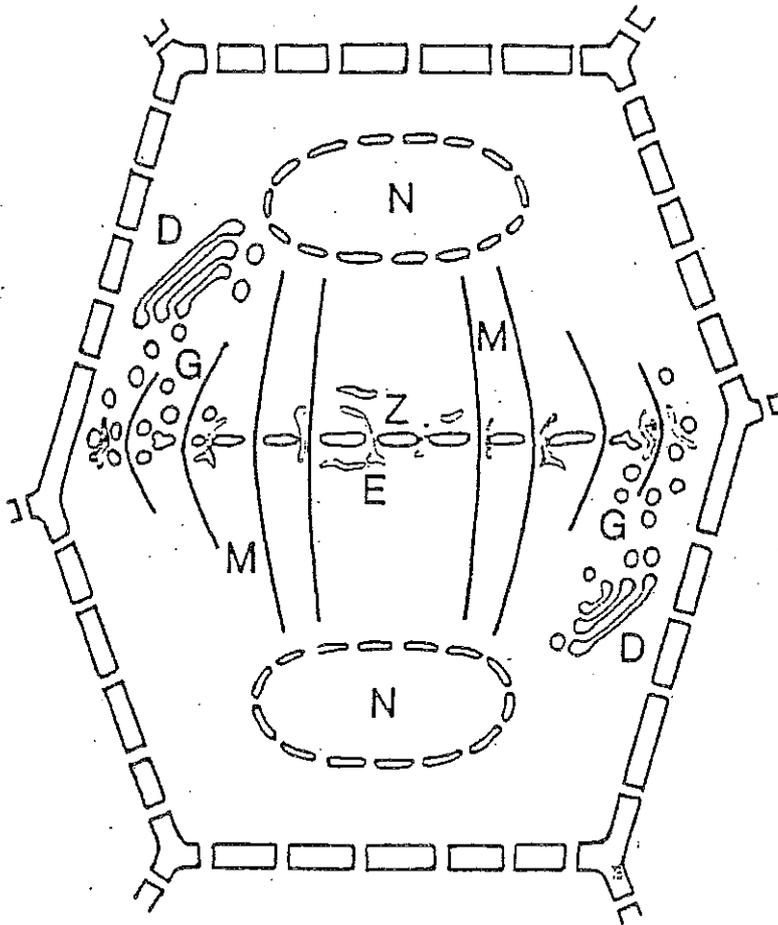


Abb. 1. Schematische Darstellung des Phragmoplasten während der Wandbildung. N Kern, M Mikrotubuli, Z Zellplatte, E endoplasmatisches Reticulum, G Golgivesikel, D Dictyosom.

(W. Hagemann, 1982)

Organismus und Zelle. Ist eine Synthese möglich?  
 Wolfgang HAGEMANN, 1982.

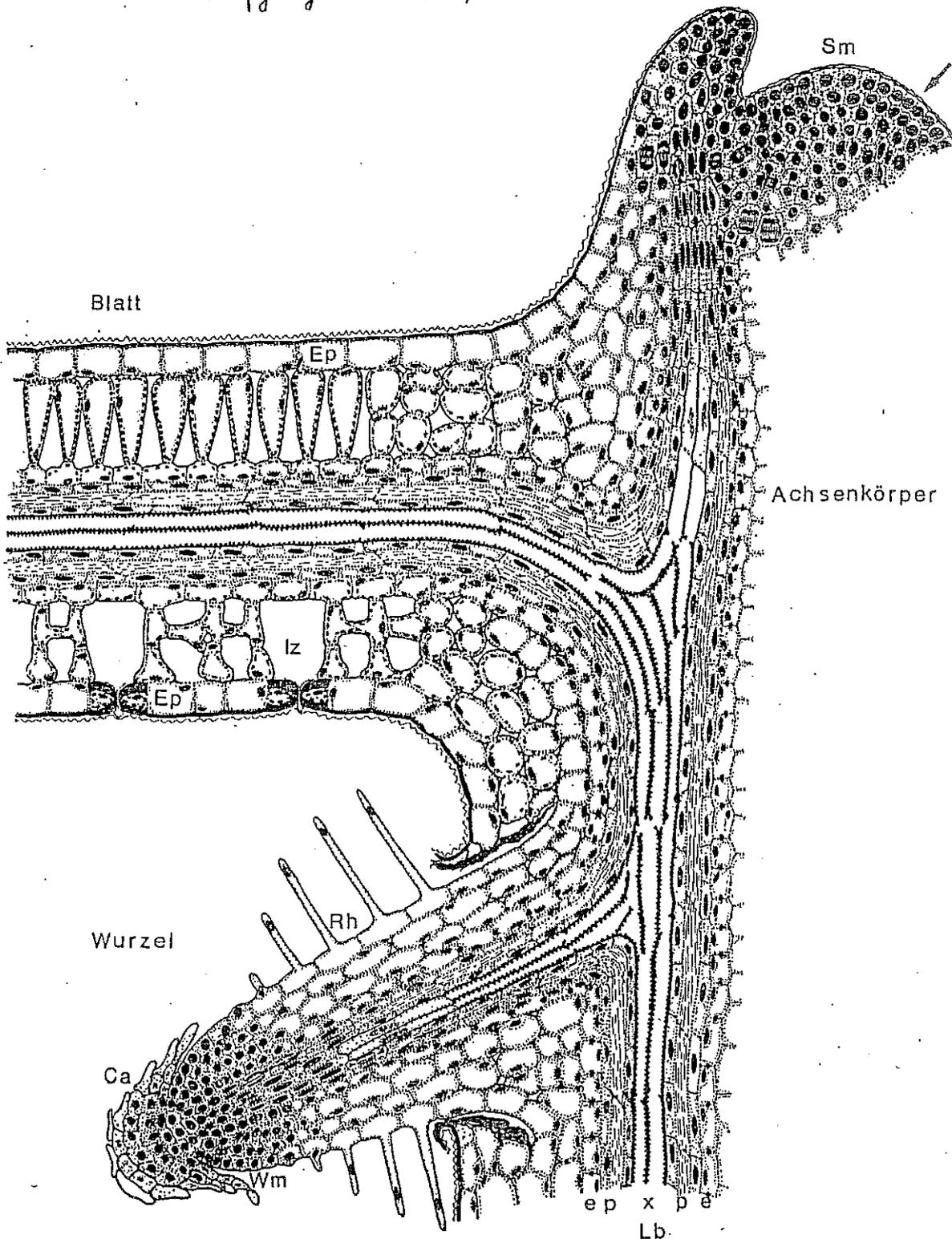
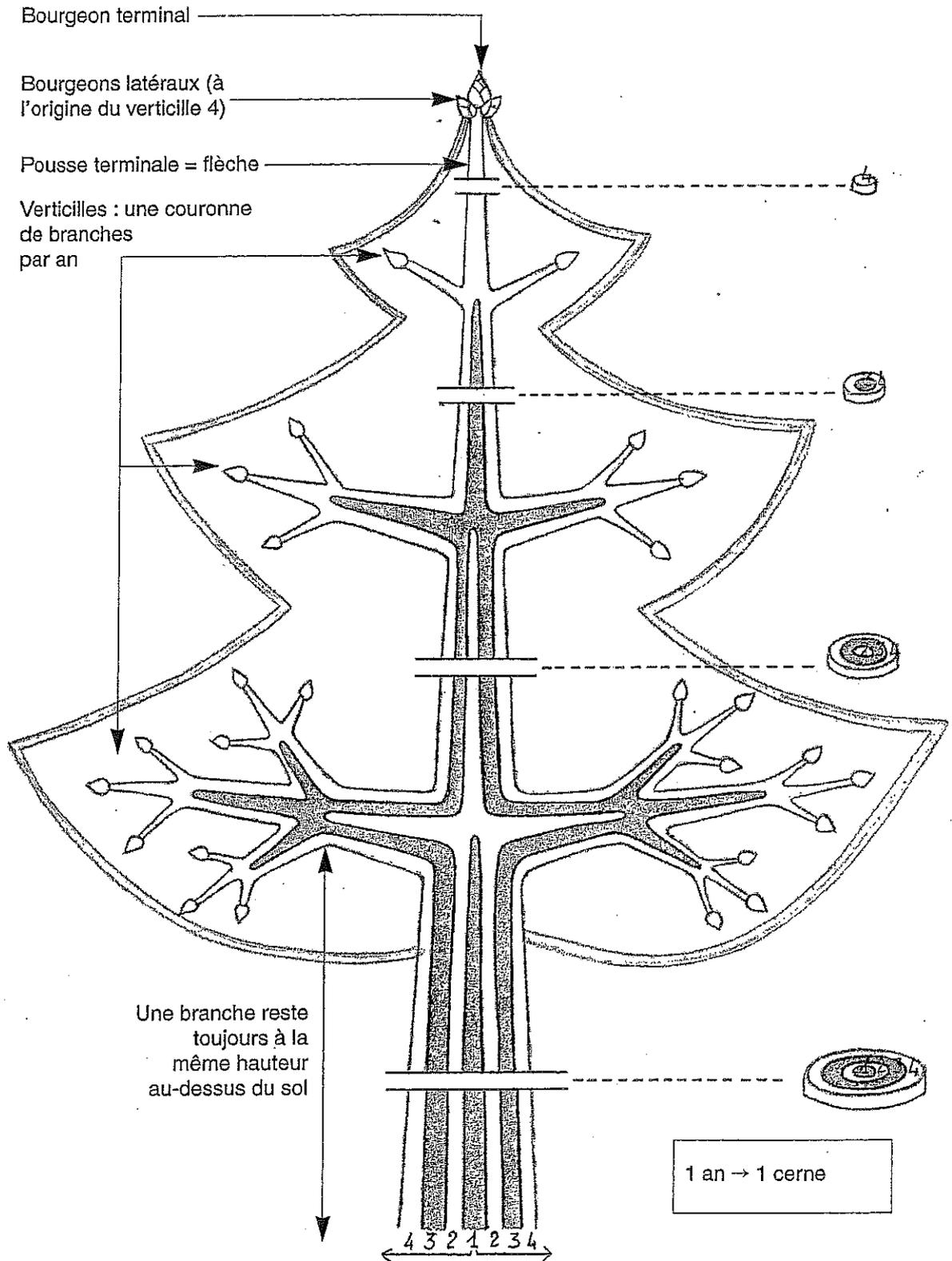


Abb.7. Schema zur histologischen Differenzierung des Cormus. Sm Sproßscheidenmeristem mit junger Blattanlage, der Pfeil weist auf den Ort der nächsten Blattbildung, Ep Epidermis mit Cuticula und Spaltöffnungen, Iz Interzellularen, Lb Leitbündel (mit e Endodermis, p Phloem, x Xylem), Wm Wurzelmeristem, Ca Calyptra, Rh Rhizodermis.

# Wachstumsgesetze des Baumes und des Holzes



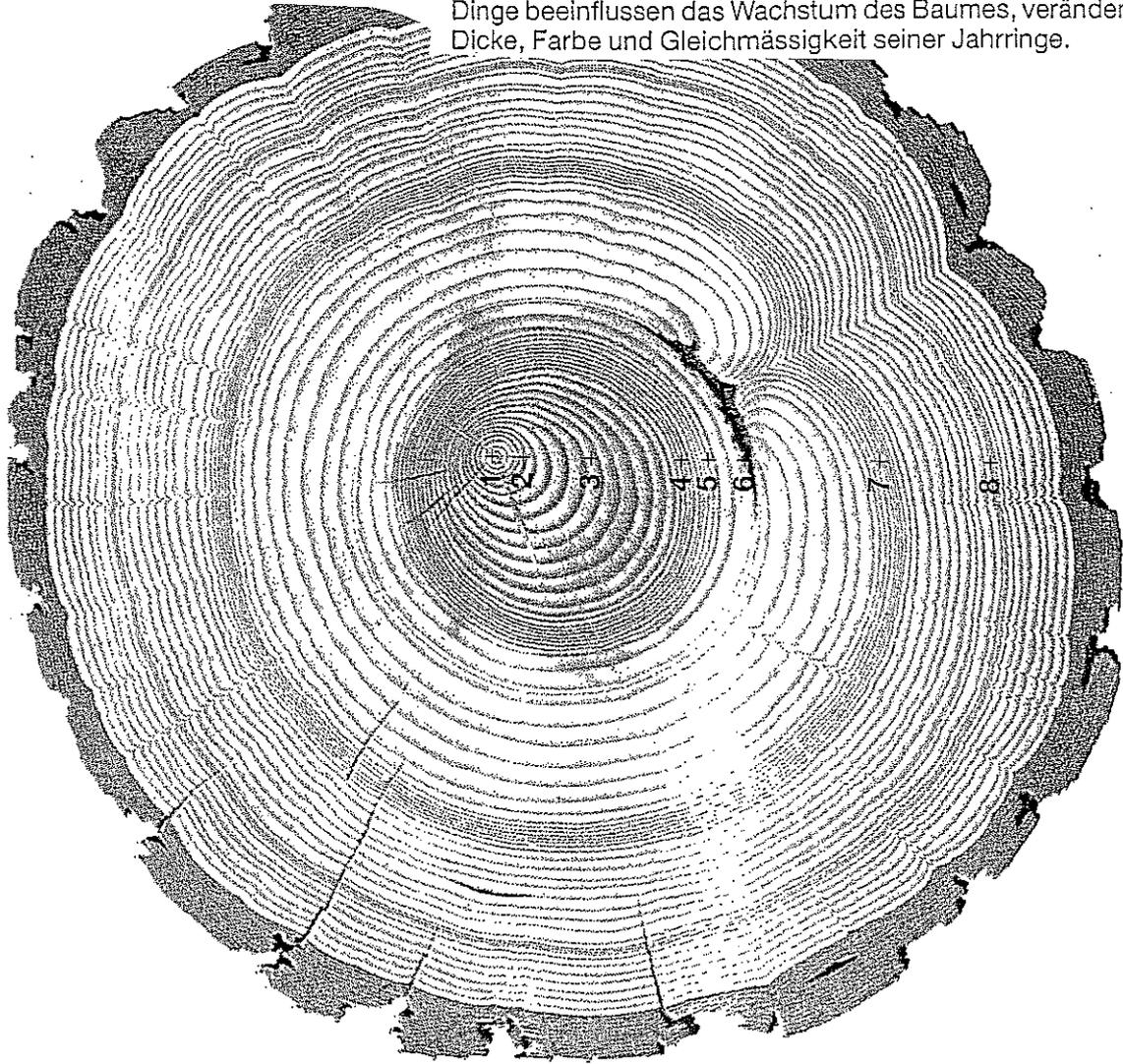
Dessin G. Engelmann-Sicard

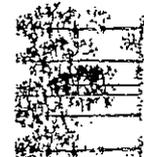
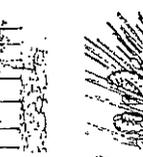
## Lebenslauf einer Föhre (Kiefer)

Sie ist 62 Jahre alt und hat Waldbrände, Trockenzeiten, Insektenbefall und manches mehr erlebt. All das ist an ihren Jahrringen ablesbar.

Wird ein Baum gefällt, so werden die Holzschichten als abwechselnde Ringe von hellem und dunklem Holz sichtbar (Jahrringe).

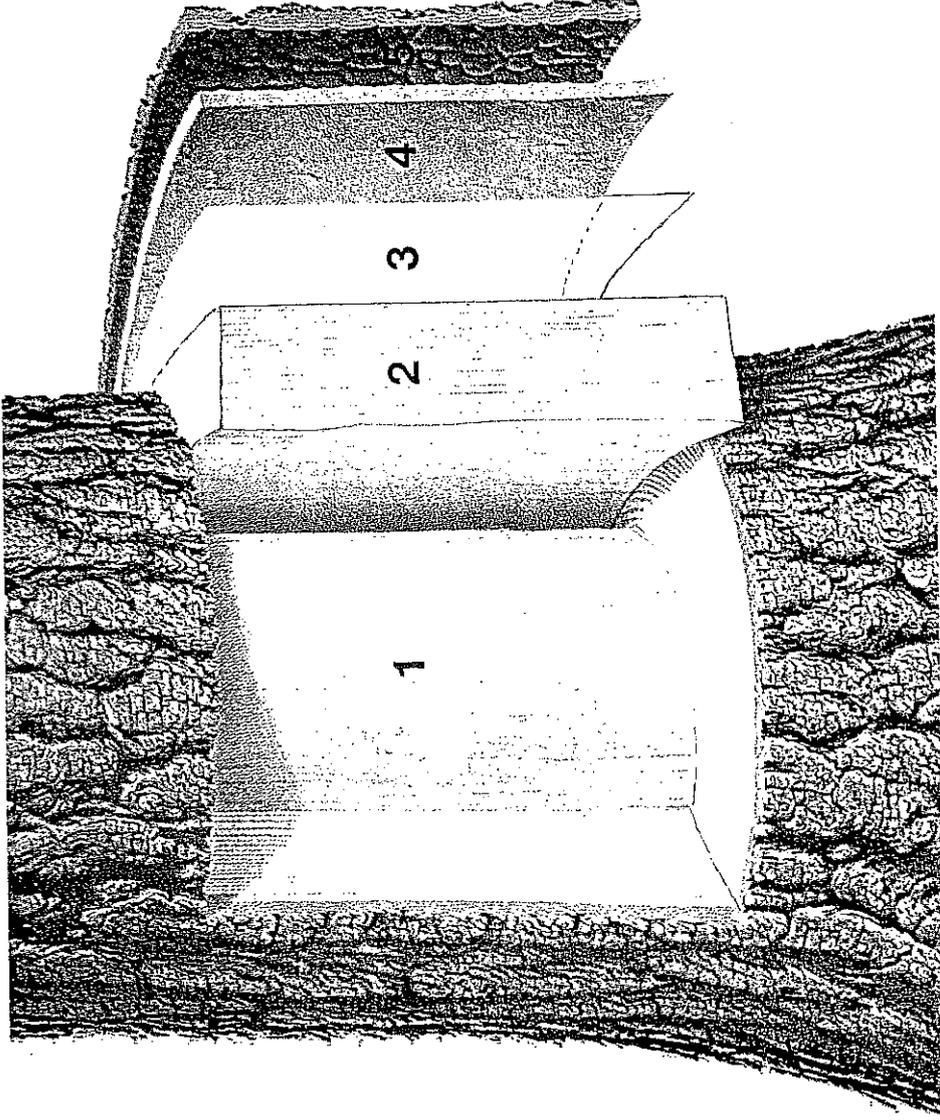
Zählt man die dunklen Ringe, so erhält man das Alter des Baumes. Untersucht man die Ringe genauer, so erfährt man weit mehr. Viele Dinge beeinflussen das Wachstum des Baumes, verändern Gestalt, Dicke, Farbe und Gleichmässigkeit seiner Jahrringe.



- 1 1913 Der Föhren-Samen keimt. 
  - 2 1918 Ohne Störungen wächst der Baum zunächst relativ schnell. Frühjahr und Sommer bringen ausreichend Regen und Sonne. Die Jahrringe sind breit und gleichmässig. 
  - 3 1923 Der Baum ist 6 Jahre alt, irgend etwas drückt gegen ihn. Er lehnt sich zur Seite und formt «Reaktionsholz», das ihn stärker stützt. 
  - 4 1933 Der Baum wächst wieder gerade. Aber auch seine Nachbarn wachsen mit. Ihre Kronen- und Wurzelsysteme nehmen ihm Wasser und Sonnenschein fort. 
  - 5 1936 Andere Bäume um ihn herum werden im Rahmen einer Durchforstung geerntet. Mehr Nahrung und Sonnenlicht lassen ihn erneut schneller weiterwachsen. 
  - 6 1939 Ein Bodenfeuer läuft durch den Wald. Zum Glück überlebt der Baum. Seine Borke schützt die darunter liegende lebende Schicht. Er ist nur verletzt. Jahr für Jahr wird die Wunde von neuem Holz überdeckt; sie überwallt. 
  - 7 1951 Die engen Jahrringe sind wahrscheinlich Ergebnis einer längeren Trockenzeit. Ein oder zwei niederschlagsarme Sommer allein hätten den Boden kaum soweit austrocknen und das Baumwachstum nennenswert mindern können. 
  - 8 1966 Eine weitere Gruppe enger Jahrringe kann durch Insektenbefall verursacht sein. Bestimmte Insektenlarven fressen die Nadeln oder Knospen vieler Nadelbaumarten. 
- 1975 Die Föhre (62 Jahre alt) wird wegen Krankheit gefällt.

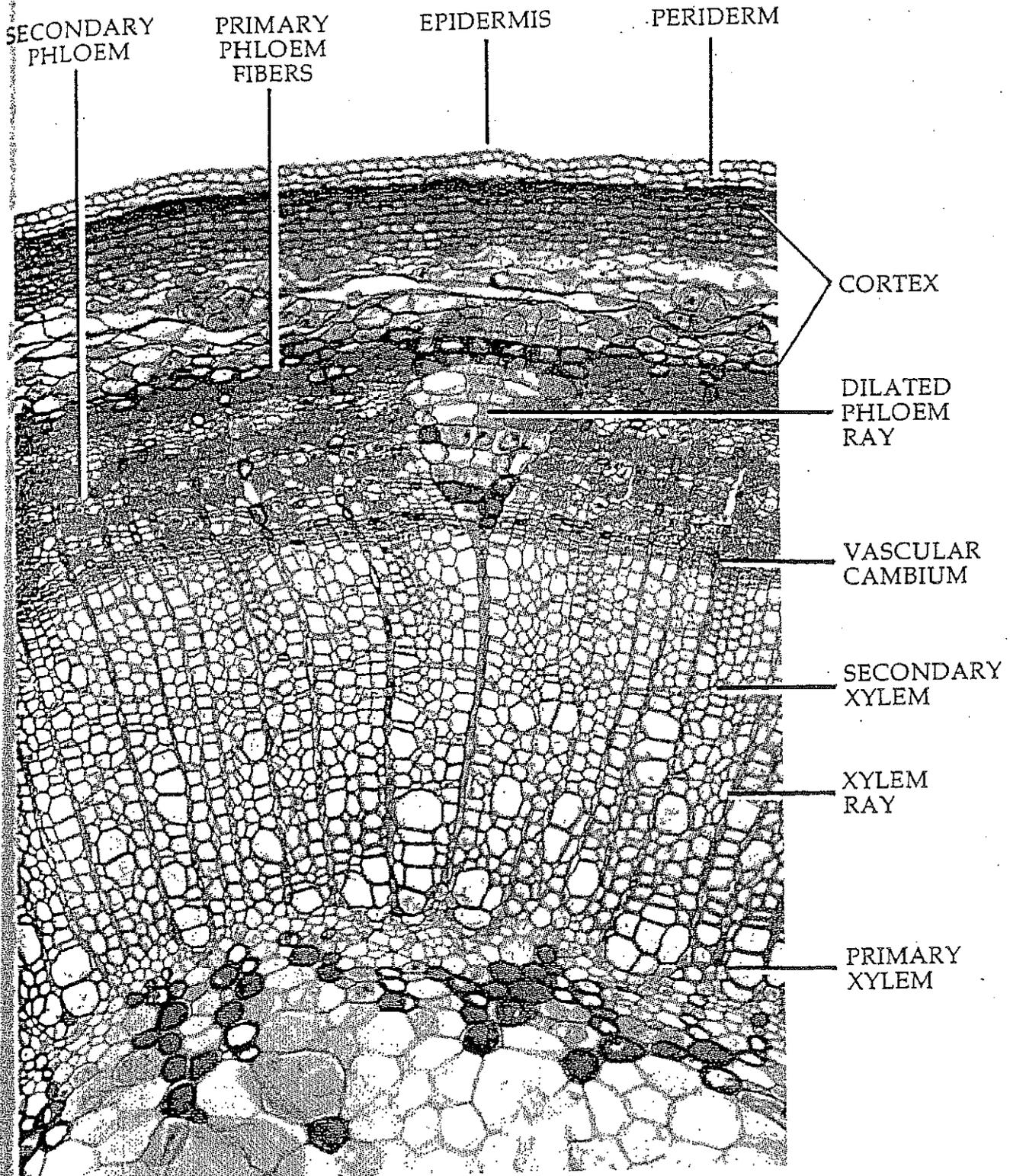
## Stammaufbau

- 1 Das Kernholz** ist die zentrale und stützende Säule des Baumes. In diesem Teil ist der Nährstofftransport eingestellt.
- 2 Das Splintholz** bildet die Nährstoffleitung des Baumes von den Haarwurzeln bis in den Kronenraum.
- 3 Das Kambium** ist das Wachstumsgewebe (cambiare = wechseln), durch die Zellteilung bilden sich nach aussen Bast- und nach innen Holzzellen.
- 4 Der Bast** ist der innere Teil der Rinde. Er ist die Versorgungsleitung des Baumes. Hier werden die Aufbaustoffe in die übrigen Baumteile transportiert.
- 5 Die Borke** ist der äussere Teil der Rinde. Bast und Borke ergeben die Rinde.



Coupe transversale d'une jeune tige

Querschnitt eines jungen Sprosses



(a)

200 μm

## Anatomie du cambium et de ses dérivés en coupe transversale

- FI: initiale fusiforme
- MI: initiale de rayon
- Zellreihen: lignées cellulaires

## Anatomie des Kambiums und seiner Derivate im Querschnitt

- FI: Fusiforminitiale
- MI: Markstrahlinitiale

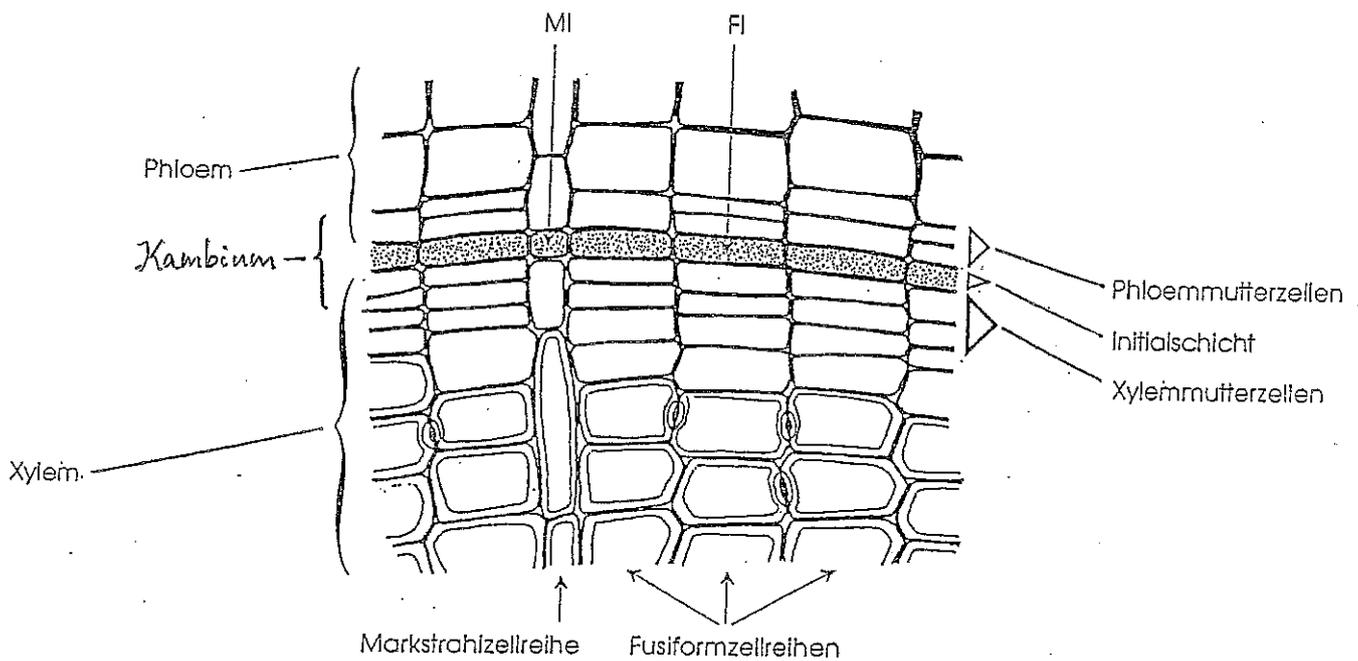


Bild 6

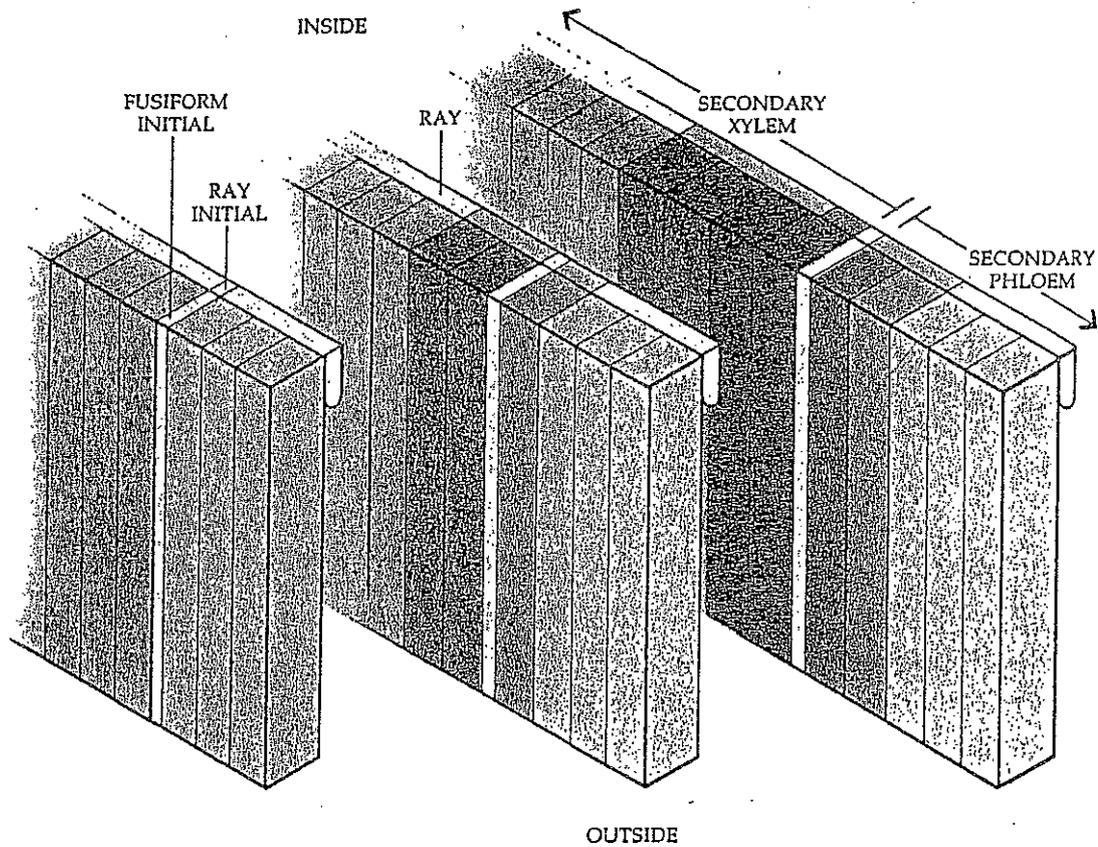
Schematische Darstellung durch die kambiale Zone, und die anschließende Xylem- sowie Phloemschicht im Querschnitt.

### Le cambium et ses dérivés:

- initiale fusiforme
- initiale de rayon
- rayon ligneux
- xylème secondaire
- phloème secondaire

### Das Kambium und seine Derivate:

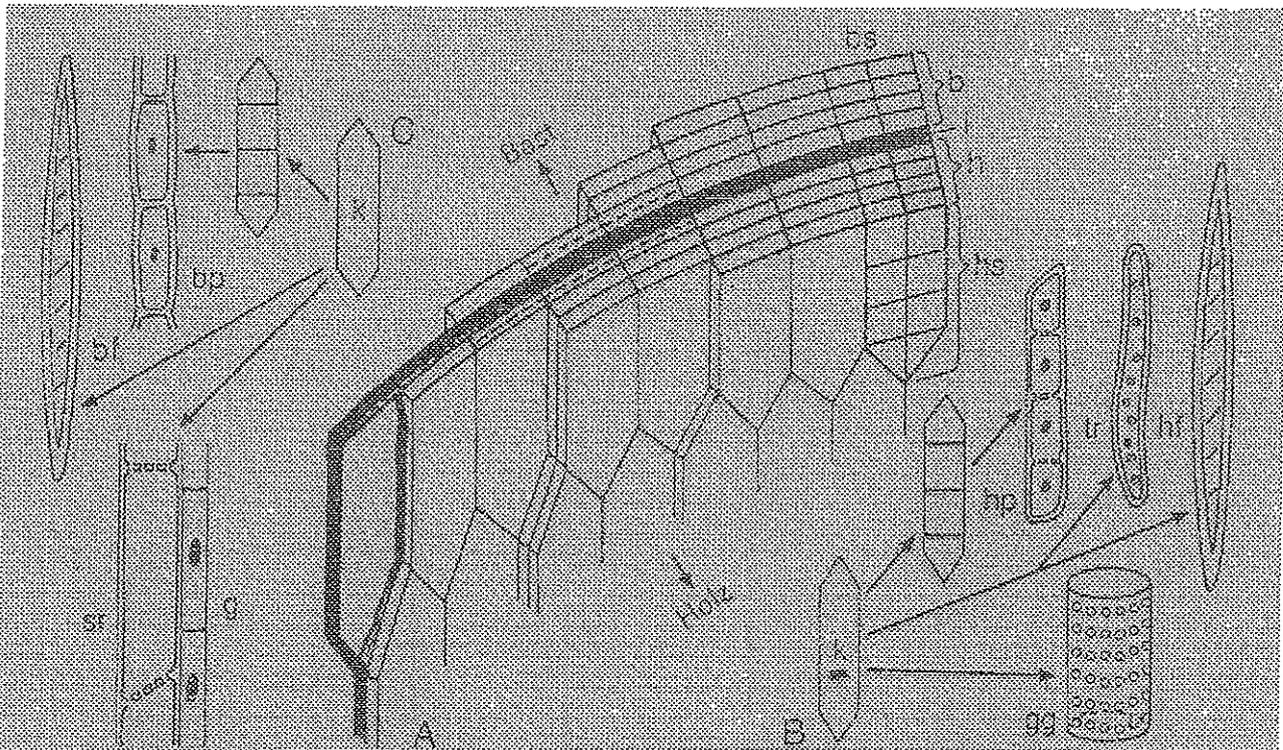
- Fusiforminitiale
- Markstrahlinitiale
- Holz- oder Markstrahl
- Sekundärxylem
- Sekundärphloem



Raven *et al.*, 1992

# Biologie du cambium - Biologie des Kambiums

Vue d'ensemble des types de cellules issus des initiales du cambium  
 Übersicht der Zelltypen, die von Kambium-Initialen gebildet werden



Schematische Darstellung der Teilungstätigkeit eines Kambiums. A. Schematisches Raumdigramm. Die prismatischen, an den Enden zugespitzten Zellen sind im oberen Teil quer geschnitten. Die Teilungsebene der Kambiumzellen ist durch eine gestrichelte Linie angedeutet. Am rechten Rand ein Parenchymstrahl. B. Entwicklung einer Kambiumzelle zu den verschiedenen Holzelementen. C. Entwicklung einer Kambiumzelle zu den verschiedenen Bastelementen. b = Bast, bf = Bastfaser, bp = Bastparenchym, bs = Baststrahl, g = Gefäßzelle, gg = Gefäßglied, h = Holz, hf = Holzfaser, hp = Holzparenchym, hs = Holzstrahl, i = Initiatschicht, k = Kambiumzelle, sr = Siebröhre, tr = Tracheide

**A:** Le plan de division des cellules cambiales est indiqué par des lignes en pointillé. Le cambium produit environ 10 fois plus de cellules en direction du bois (Holz) qu'en direction du liber (Bast). La plupart des cellules est de forme allongée (prosenchymateuse); le groupe de droite est constitué de cellules courtes et à parois minces (parenchymateuses), constituant ici un rayon ligneux.

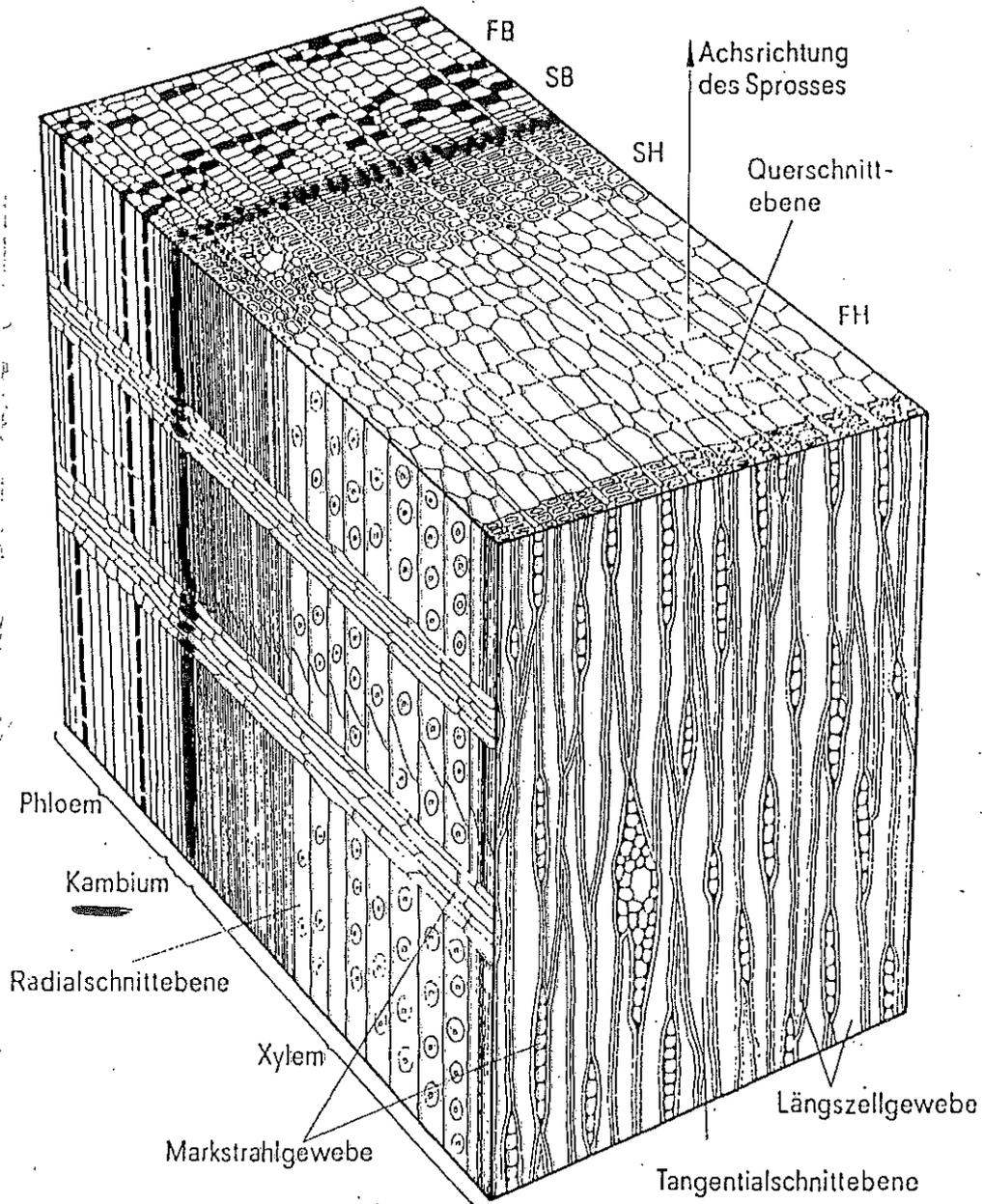
**B:** Formation de différents types de cellules du bois (xylème) à partir des initiales cambiales non encore différenciées.

**C:** Formation de différents types de cellules du liber (phloème) à partir des initiales cambiales non encore différenciées.

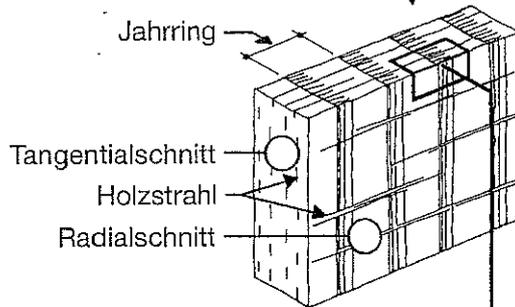
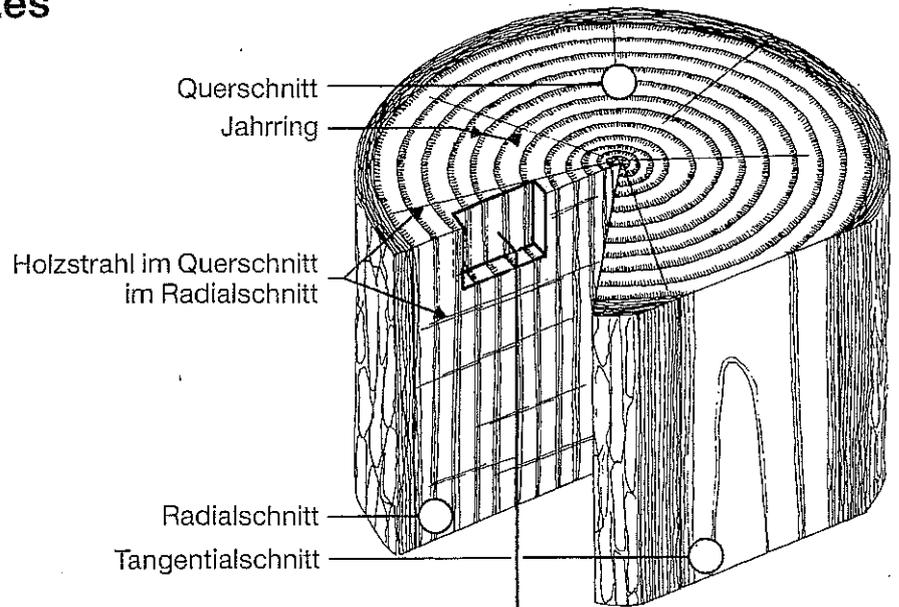
- |     |     |     |
|-----|-----|-----|
| b:  | bf: | bp: |
| bs: | g:  | gg: |
| h:  | hf: | hp: |
| hs: | i:  | k:  |
| sr: | tr: |     |

## Struktur und Funktion des letzten Jahrringes eines Nadelholzes

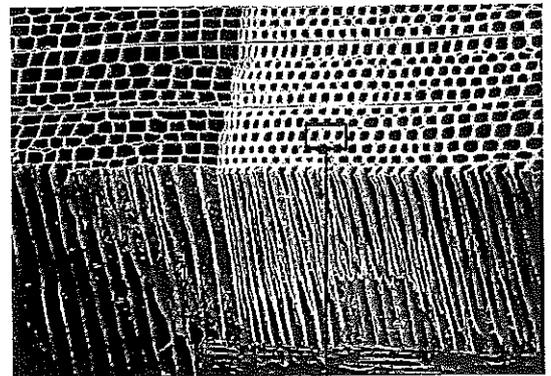
Topographische Darstellung der Phloem-, Kambium- und Xylem-  
gewebe in Lärche (nach B.A. MEIER 1973). *FB* Frühbast, *SB*  
Spätbast, *SH* Spätholz, *FH* Frühholz (Vergr. 75:1).



# Aufbau des Nadelholzes



Querschnitt mit Radialkante,  
 rasterelektronenmikroskopische  
 Aufnahme (Fichte)  
 Vergrößerung 56x



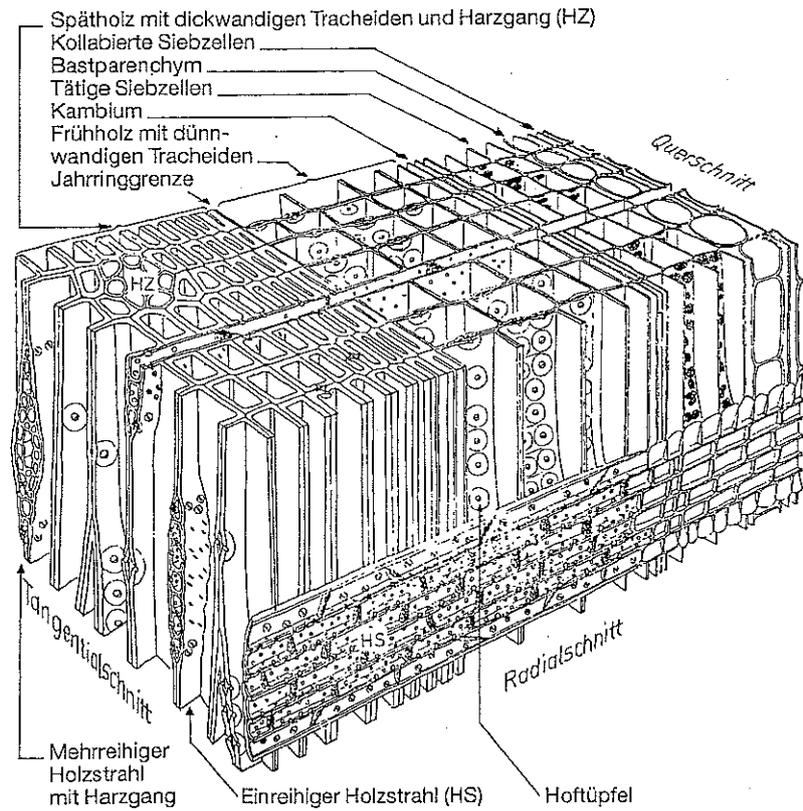
Jahrringgrenze

Querschnitt mit Zellwänden  
 und Hoftüpfeln  
 rasterelektronenmikroskopische  
 Aufnahme (Fichte)  
 Vergrößerung 1100x



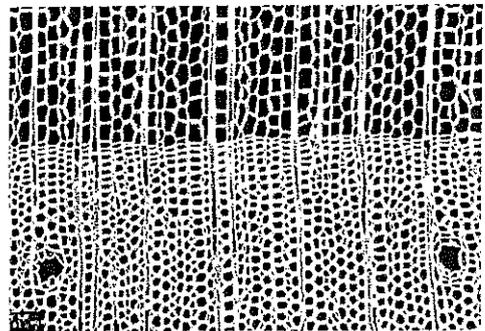
# Aufbau des Nadelholzes

Räumliche Darstellung von Holz und Bast eines Nadelbaumes (Lärche).  
(Nach Mägdefrau, 1951)



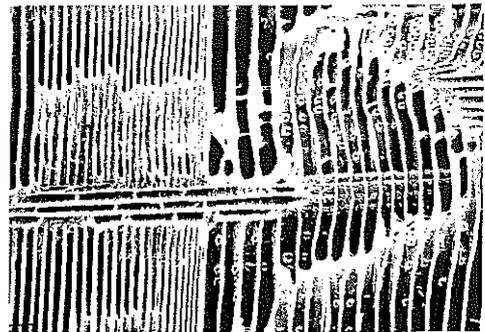
## Querschnitt

rasterelektronen-  
mikroskopische  
Aufnahme (Lärche)  
Vergrößerung 58,6x



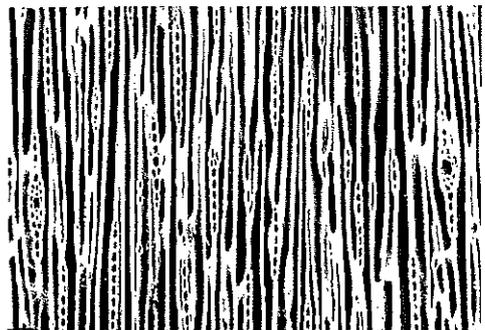
## Radialschnitt

rasterelektronen-  
mikroskopische  
Aufnahme (Lärche)  
Vergrößerung 58,6x



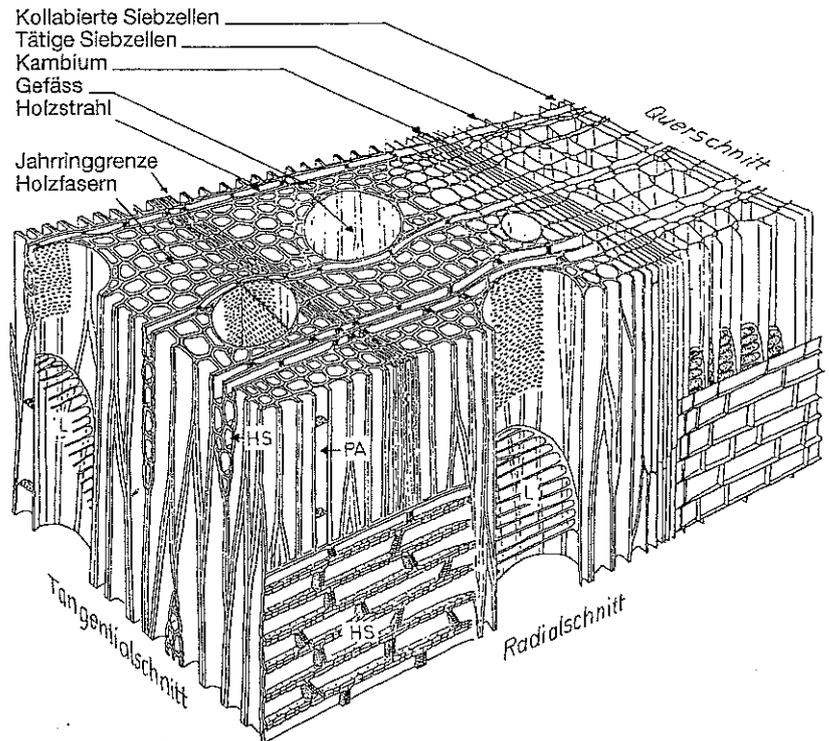
## Tangentialschnitt

rasterelektronen-  
mikroskopische  
Aufnahme (Lärche)  
Vergrößerung 58,6x



# Aufbau des Laubholzes

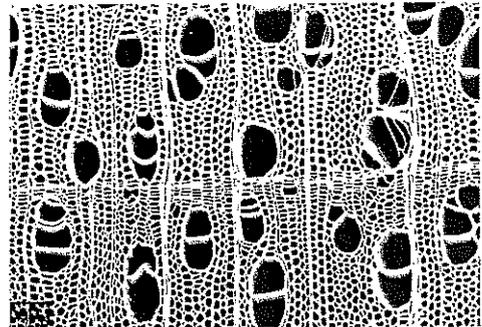
Räumliche Darstellung von Holz und Bast eines Laubbaumes (Birke).  
(Nach Mägdefrau, 1951)



HS = Holzstrahl  
PA = Parenchymzelle  
L = leiterförmige Gefässdurchbrechung

## Querschnitt

rasterelektronen-  
mikroskopische  
Aufnahme (Birke)  
Vergrößerung 58,6x



## Radialschnitt

rasterelektronen-  
mikroskopische  
Aufnahme (Birke)  
Vergrößerung 58,6x



## Tangentialschnitt

rasterelektronen-  
mikroskopische  
Aufnahme (Birke)  
Vergrößerung 58,6x



# Funktion & Struktur

## GEWEBESYSTEME



Wasserleitgewebe



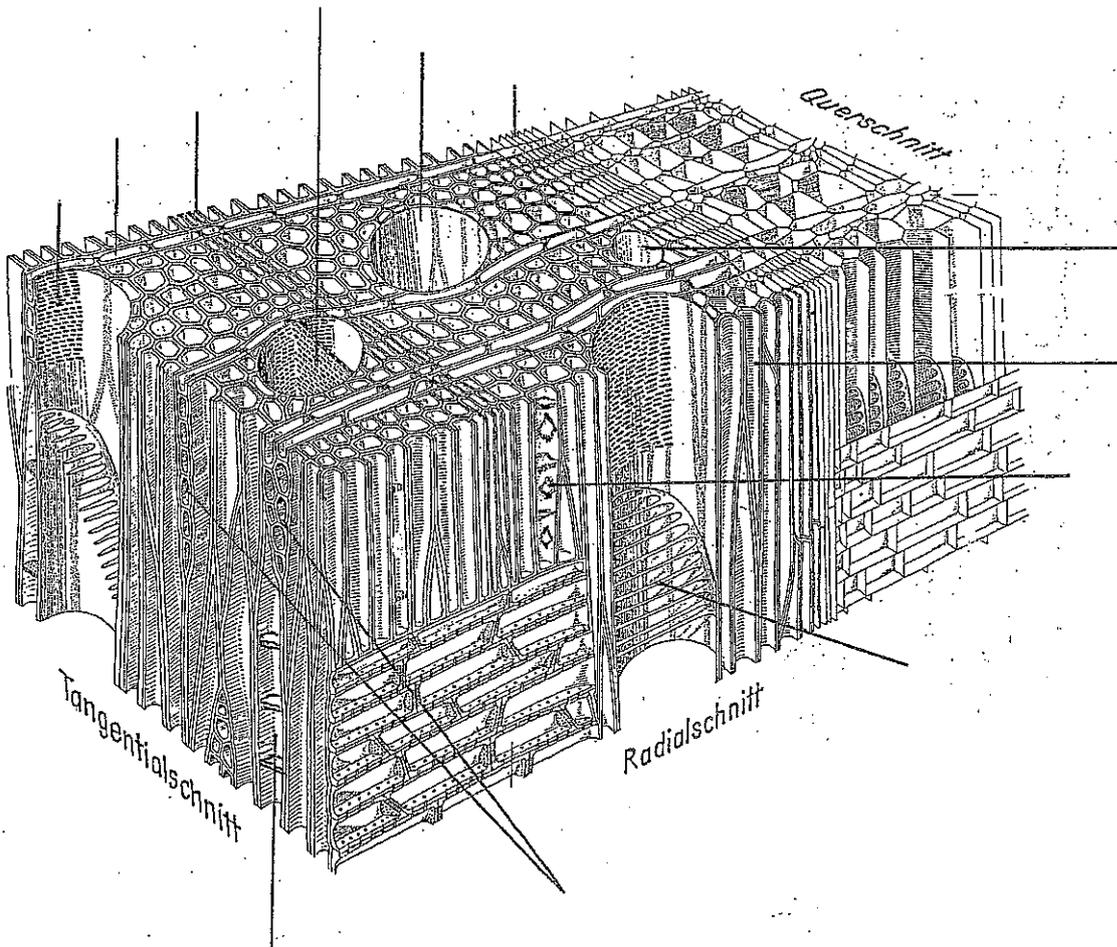
Festigungsgewebe



Speichergewebe



Exkretions- und Schutzgewebe



Holzstruktur

Bei einer Laubbaumart

(nach Mägdefrau, verändert)

## DEFINITIONEN zur MIKROSKOPIE DES HOLZES

### Allgemein

**Zelle:** Holz besteht aus Zellen. Jede dieser Zellen besitzt eine Zellwand und einen Zellraum. Zellgruppen gleicher Art werden als Gewebe bezeichnet.

**Meristem / Kambium:** Bildungs- und Teilungsgewebe (Grundgewebe) der Pflanzen. Zu unterscheiden ist u.a. zwischen dem das Längenwachstum bewirkenden Vegetationskegel an der Spitze von Sprossen und Wurzeln und dem flächigen Bildungsmantel (Kambium), der durch Zellteilung und -abscheidung das Dickenwachstum veranlaßt.

**Kambium:** Die dünne Schicht aus lebenden, meristematischen (sich vermehrenden) Zellen zwischen Rinde (Pholem) und Holz (Xylem), die durch ständige Teilung nach außen neue Rindenzellen und nach innen neue Holzzellen bilden. Sie bewirken das Dickenwachstum verholzender Pflanzen.

**Xylem:** Das Zellgewebe des Baumes (ausgenommen der Markröhre) innerhalb des Kambiums. Gleichbedeutend mit Holz.

**Rinde:** Alle Stamm- und Astteile außerhalb des Kambiums, bestehend aus lebender Innenrinde (Pholem) und toter Außenrinde (Periderm, Borke).

**Schnittrichtungen:** Der besondere Aufbau des Holzes macht die Unterscheidung von drei Schnittrichtungen erforderlich: der Querschnitt, auch Hirnschnitt genannt, der Flader- oder Tangentialschnitt und der Spiegel- oder Radialschnitt, der auch als Riftschnitt oder Quartier bezeichnet wird (siehe auch: Fladern, Holzstrahlen, Schwindung).

**Querschnitt:** Quer zur Stammachse bzw. zum Faserverlauf geführter Schnitt. Er ist für die mikro- und makroskopische Bestimmung des Holzes am besten geeignet. Auf der Querschnittsfläche zeigen sich Jahrringaufbau, Längsparenchym und Holzstrahlen am deutlichsten.

**Radialschnitt:** Die Jahrringe sind als parallel zur Stammachse verlaufende und die Markstrahlen als radial verlaufende Streifen zu sehen. Die längs angeschnittenen Markstrahlen erscheinen als glänzende Spiegel.

**Tangentialschnitt:** Die Jahrringe erscheinen in bogen- und wellenförmigen Linien. Größere Markstrahlen, die rechtwinklig durchschnitten werden, treten als spindelförmige dunkle Striche auf (hauptsächlich Eiche und Buche).

**Frühholz:** Die meist hellere und weichere Schicht, die zu Beginn einer Wachstumsperiode (Frühjahr) entsteht und meistens bei Nadelhölzern besonders deutlich ausgebildet ist; häufig gekennzeichnet durch größere Zellen und niedrigere Rohdichte (siehe auch: Blume, Fladern und Spätholz).

**Spätholz:** Auf das Frühholz folgende, bei Laubhölzern meist porenärmere und bei Nadelhölzern besonders dunkle und harte Zonen; sie bilden den Abschluß einer Zuwachszone.

**Gewebetypen:** Zur Erfüllung ihrer verschiedenen Aufgaben im Holzkörper werden unterschieden: **a. Leitgewebe** für den Stofftransport (Saftströme), bestehend aus Gefäßen (Poren) bei Laubhölzern bzw. Frühholztracheiden bei Nadelhölzern; **b. Speichergewebe** für Stoffwechsel und Stoffspeicherung, bestehend aus Parenchymzellen; **c. Stütz- oder Festigungsgewebe** bestehend aus Fasern bei Laubhölzern und aus eher Spätholz-tracheiden bei Nadelhölzern; **d. Exkretions- und Schutzgewebe** bestehend aus Harzkanälen bei bestimmten Nadelhölzern.

N.b.: Die Holzstrahlen bestehen aus speichernden und bei harzhaltigen Nadelhölzern auch leitenden Zellelementen (Parenchymzellen, resp. Markstrahltracheiden).

**Mark- oder Holzstrahlen:** Quer zur Faser verlaufende und auf die Markröhre gerichtete Bänder aus Speicherzellen. Sie erscheinen auf Querschnitten als feine, oft nur mit der Lupe erkennbare Linien ("Strahlen") und auf dem Radialschnitt als "Spiegel", teils so breit, daß sie das Holzbild, wie bei den Eichen, wesentlich beeinflussen (siehe: Schnittrichtungen, Stockwerkbau).

**Parenchymzellen:** Zellen mit Hauptfunktion, Nähr- und Aufbaustoffe zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. Die Zellwände sind zur Erhöhung der Durchlässigkeit nach allen Seiten durchlöchert (siehe auch Tüpfel).

**Speicherzellen:** Überwiegend dünnwandige und kurze, in Faserrichtung verlaufende Zellen (Parenchymzellen), die, in großer Zahl vorkommend, das Holzbild durch eine von den Fasern abweichende Färbung stark beeinflussen können, wie z. B. bei Wenge. Das Vorkommen und die Art der Anordnung auf dem Querschnitt sind ein gutes Bestimmungsmerkmal (siehe auch: Fladern, Holzstrahlen, Streifer). Markstrahl-parenchymzellen haben auch eine Speicherfunktion.

**Tüpfel:** Dünnstellen in der Zellwand zwischen benachbarten Zellen, die den Wasser- und Stofftransport von Zelle zu Zelle ermöglichen.

**Mineralische Einlagerungen:** Meist nur mit dem Mikroskop erkennbare Teilchen, die häufig aus Kiesel ( $\text{SiO}_2$ ) oder Karbonaten bestehen. Sie sind für bestimmte Arten charakteristisch, wie z. B. für Kosiho, und können bei der Bearbeitung des trockenen Holzes die Werkzeuge stärker stumpfen. Vereinzelt können auch grobe, steinartige Einlagerungen vorkommen und Werkzeuge erheblich beschädigen. (siehe auch: Kalkflecken, Kernstoffpartikel).

## Nadelholz

**Tracheiden:** mit einem Anteil von 90% Hauptform der Nadelhölzer; sie verlaufen parallel zur Stammachse (Längstracheiden) und haben die Aufgabe der Wasserleitung und Festigkeit.

**Harzkanäle, Harzgänge:** Röhrenartige, mit Harz oder harzähnlichen Substanzen angefüllte Hohlräume, die meist in Faserrichtung verlaufen, aber auch horizontal in bestimmten Markstrahlen. Aufgrund ihrer geringen Durchmesser werden sie erst durch austretende Harztropfen, Flecken oder durch eine stark abweichende Harzfärbung erkennbar. Vor allem typisch für viele Nadelhölzer. Sie können aber auch in Laubhölzern vorkommen, bei letzteren im Querschnitt auch zu Ringen geordnet.

## Laubholz

**Tracheen:** langgestreckte runde oder ovale Zellen, deren Querwände gänzlich oder teilweise geöffnet sind.

**Gefäße:** Auch als Tracheen, im Querschnitt als Poren bezeichnet; charakteristische Zellart der Laubhölzer. Sie bestehen aus einzelnen röhrenförmigen Gliedern, die übereinander angeordnet sind und deren Querwände gleich nach der Entstehung der Zelle wieder aufgelöst werden, sodaß ihre Länge oft mehrere Meter erreichen kann. Sie dienen im Splintholz der Wasserleitung.

**Poren:** Durch Gefäßzellen gebildete feine Röhren, die im Querschnitt runde oder ovale Öffnungen und auf Längsschnittflächen rillenartige Vertiefungen bilden. Bei grobporigen Hölzern sind die einzelnen Poren mit bloßem Auge erkennbar, wie z. B. bei Wenge; bei mittelgroßen Poren ist nur das Vorhandensein der Poren, aber nicht die einzelne unterscheidbar, wie z.B. bei Makore; bei feinporigen Hölzern, wie z.B. bei Mansonia sind Poren nur noch mit der Lupe auf glatten Querschnitten sichtbar; Nadelhölzer sind porenlos.

**Thyllen:** Artbedingte blasenartige Zelleinwüchse, welche die Poren verschließen können und die Abgabe wie die Aufnahme von Feuchtigkeit beeinflussen können; Thyllen fehlen im Splint.

**Ringporigkeit:** Im Querschnitt periodisch wiederkehrende Ringe aus eng liegenden größeren Poren (Frühholz), die mit Ringen aus kleineren und weniger zahlreichen Poren abwechseln (Spätholz). Ringporige Hölzer ergeben im radialen Anschnitt Poren-Streifer und tangential Poren-Fladern (siehe auch: Blume, Fladern, Frühholz, Spätholz, Streifer, Zerstreutporigkeit).

**Halbringporigkeit:** Zwischenstellung zwischen ring- und zerstreutporig; die Gefäße im Frühholz sind nur wenig größer als im Spätholz, auch fehlt den Frühholzgefäßen die Kranz-(ring)förmige Anordnung wie bei den typisch ringporigen Arten, Z.B. Nußbaum und Kirschbaum.

**Zerstreutporigkeit:** Im Querschnitt ohne deutliche Zonierung durch Poren, weil diese gleichmäßig verteilt sind; Längsschnitte ohne durch Poren bedingte Strukturbilder, wie Poren-Fladern oder Poren-Streifer (siehe auch: Fladern, Streifer, Ringporigkeit).

**Fasern:** Lange, englumige und dickwandige Zellen mit spitz auslaufenden Enden, die wesentlich zur Festigkeitsbildung des Holzes beitragen. Bei Laubholz vorwiegend als Librifasern.

**Bandparenchym:** Gruppenweise Anordnung von Längsparenchym auf dem Querschnitt in Form von schmalen, tangential gerichteten, hellerfarbigen Linien (wie z.B. bei Hickory oder Eiche).

**Konfluentes Parenchym:** Anordnung von Längsparenchymzellen auf dem Querschnitt in Form von mehr oder weniger tangentialen Bändern (siehe auch Bandparenchym).

**Terminal-Parenchym:** Meist sehr schmale, aber deutliche, helle, tangentiale Bänder aus Parenchymzellen als Trennungslinien zwischen den Zuwachszonen, wie z.B. bei Pappel.

# Propriétés pratiques du bois déduites de l'anatomie

## *Ableitung praktischer Holzeigenschaften von der Anatomie*

### Formation / Structures

#### *Bildung / Aufbau*

- Epaisseur des parois et part de fibres      *Zellwanddicke und Faseranteil*
- Longueur des fibres      *Faserlänge*
- Largeur des rayons ligneux      *Markstrahlbreite*
- Contraste bois initial - bois final      *Frühholz-Spätholz-Kontrast*
- Canaux et poches résinifères      *Harzkanäle, Harztaschen*

### Maturation / Vieillissement

#### *Alterung*

- Etat des structures conductrices      *Zustand der Leitbahnen*
- Inclusions phénoliques      *Phenolische Einlagerungen*
- Cristaux      *Kristalle*

### Etat général

#### *Erhaltung*

- Hypthes de champignons?      *Pilzhyphen?*

# Liste des essences examinées / mentionnées en anatomie du bois

## Artenliste der Vorlesung / Übungen in Holzanatomie

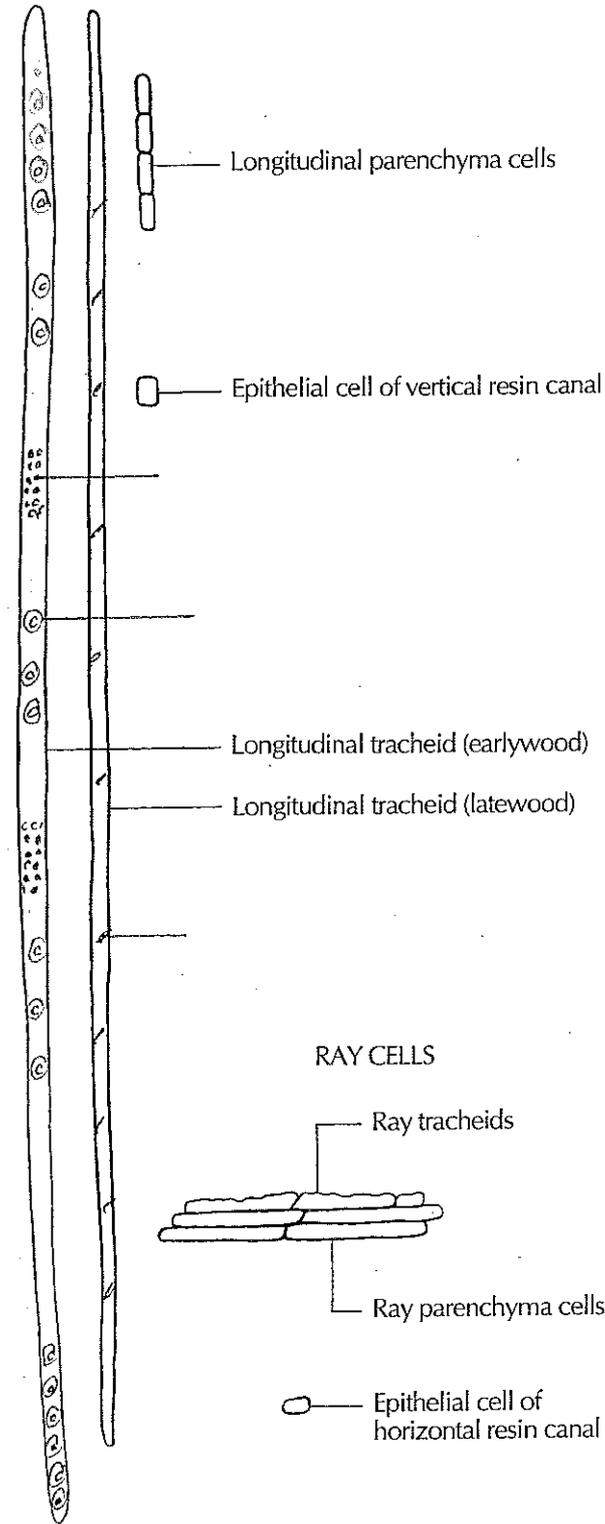
Nom scientifique Wissenschaftliche Bezeichnung	deutscher Name	nom français
<u>NADELHOELZER</u>		
Abies alba Mill.	Weisstanne	sapin (blanc, pectiné)
Larix decidua Mill.	Lärche	mélèze
Picea abies Karst.	Fichte	épicéa
Pinus cembra L.	Arve	arolle
Pinus silvestris L.	Waldföhre	pin silvestre
Pinus strobus L.	Weymouths-Föhre	pin de Weymouth
Pseudotsuga sp.	Douglasie	sapin de Douglas
Taxus baccata L.	Eibe	if
Sträucher		
Juniperus communis L.	gemeiner Wacholder	genévrier commun
<u>LAUBHOELZER</u>		
Acer pseudoplatanus L.	Bergahorn	érable de montagne
Aesculus hippocastanum L.	Rosskastanie	marronnier (d'Inde)
Alnus glutinosa Gärtn.	Schwarzerle	aune glutineux
Alnus incana Mönch.	Weisserle	aune blanc
Betula verrucosa Ehrh.	Warzenbirke	bouleau verruqueux
Buxus sempervirens L.	Buchs	buis
Carpinus betulus L.	Hagebuche	charme, charmille
Castanea sativa Mill.	Edelkastanie	châtaignier
Fagus silvatica L.	Buche, Rotbuche	hêtre, foyard
Fraxinus excelsior L.	Esche	frêne
Juglans regia L.	Walnussbaum	noyer (commun)
Malus communis Poir.	allgemeiner Apfelbaum	pommier commun
Ostrya carpinifolia Scop.	Hopfenbuche	charme houblon
Pirus communis L.	wilder Birnbaum	poirier sauvage
Platanus x hybrida	Platane	platane
Populus alba L.	Weisspappel	peuplier blanc
Populus tremula L.	Aspe, Zitterpappel	peuplier tremble
Prunus avium L.	Kirschbaum	cerisier
Quercus petraea Liebl., Q. robur L.	Traubeneiche, Stieleiche	chêne rouvre, ch. pédonculé
Robinia pseudacacia L.	Robinie	robinier
Salix alba L.	Weissweide	saule blanc
Tilia platyphyllos Scop.	Sommerlinde	tilleul à grandes feuilles
Ulmus glabra Huds.	Bergulme	orme de montagne

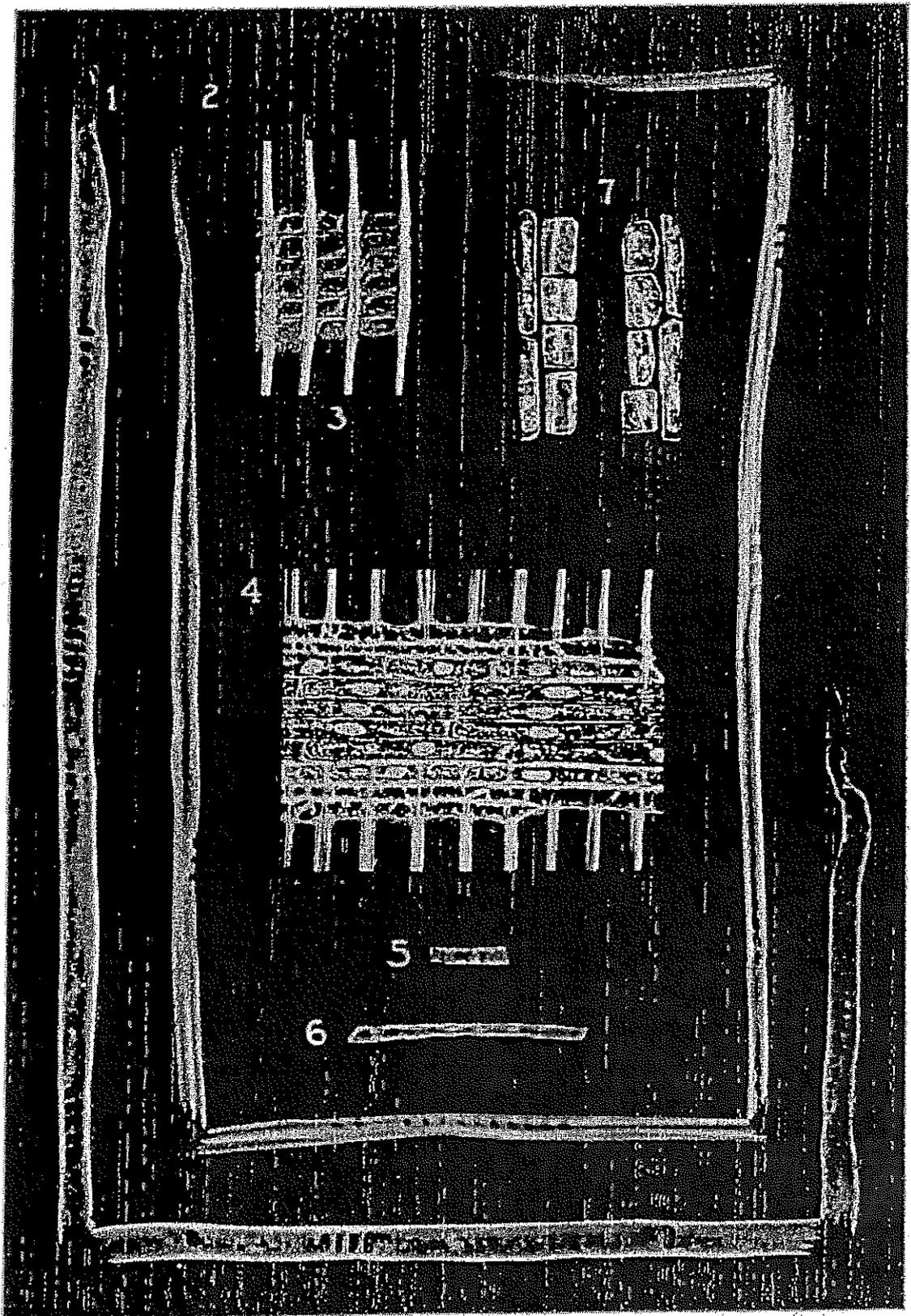
# Zelltypen der Nadelhölzer

## CONIFER CELL TYPES

This diagram shows the relative sizes and shapes of longitudinal cells and ray cells in conifers.

### LONGITUDINAL CELLS





W. M. Harlow, New York State College of Forestry

### Bestandteile eines Nadelholzes

### Elements of a coniferous wood

Rotkiefer

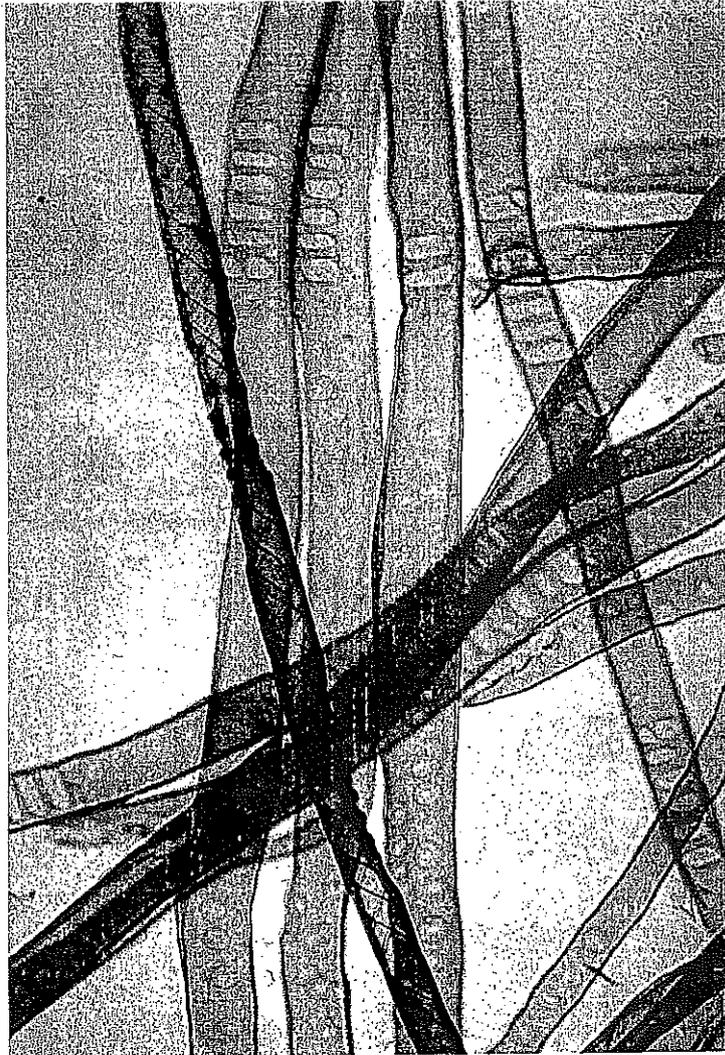
*Pinus resinosa*

Red Pine

1. Frühholztracheide  $\times-77$  (die Reihen großer fensterähnlicher Tüpfel befinden sich an den Berührungspunkten mit Markstrahlen). 2. Spätholztracheide  $\times-77$ . 3. Radialer Längsschnitt durch einen Markstrahl (fensterähnliche Tüpfel, die in die Längstracheiden führen)  $\times-104$ . 4. Seitenansicht eines Markstrahls. In der Mitte Markstrahlparenchym, außen zackige Markstrahltracheiden  $\times-104$ . 5. Einzelne tracheidale Markstrahlzelle  $\times-77$ . 6. Einzelne parenchymatische Markstrahlzelle  $\times-77$ . 7. Epithel-Zellen, das Innere eines Harzganges auskleidend  $\times-104$ .

## Axiale oder Längstracheiden bei Föhren

- FT:** Frühholztracheide (grosser Durchmesser / dünne Wand)
- ST:** Spätholztracheide (kleiner Durchmesser / dicke Wand / evtl. Schraubenrisse)
- HT:** Hoftüpfel (Kontakt von Tracheide zu Tracheide)
- FT:** Fenstertüpfel (Kontakt von Tracheide zu Markstrahl-Parenchymzelle)

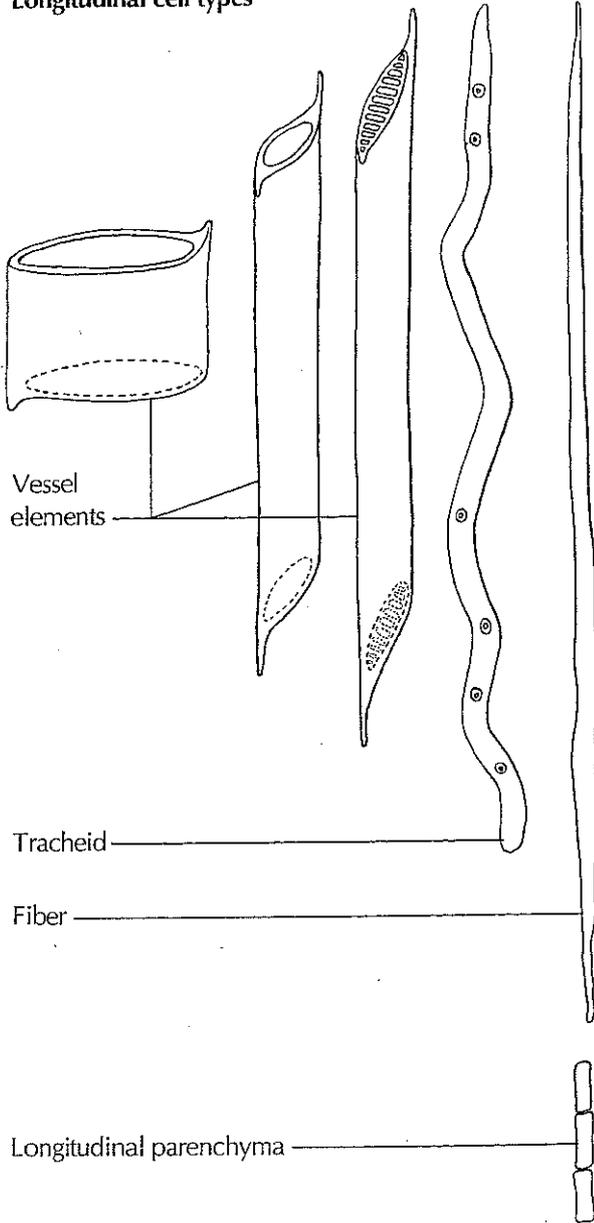


# Zellelemente der Laubhölzer

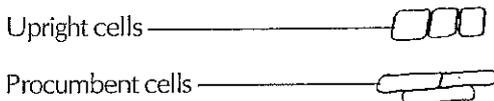
## HARDWOOD CELL TYPES

This diagram shows the relative sizes and shapes of typical cell types found among hardwoods.

### Longitudinal cell types

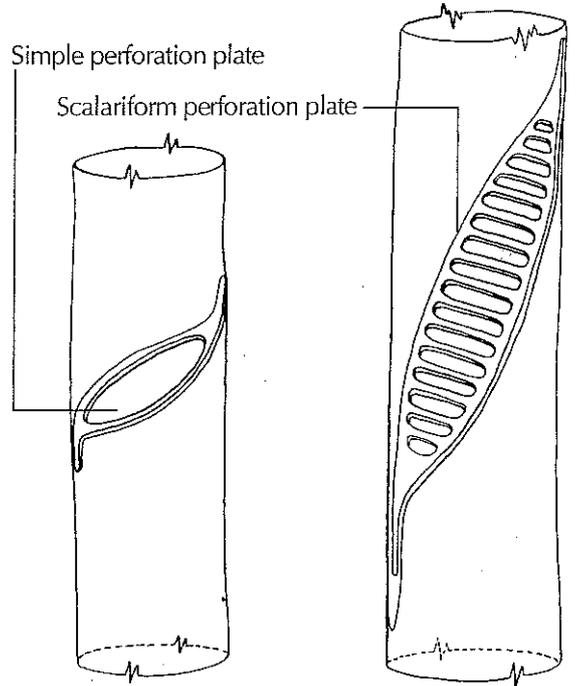


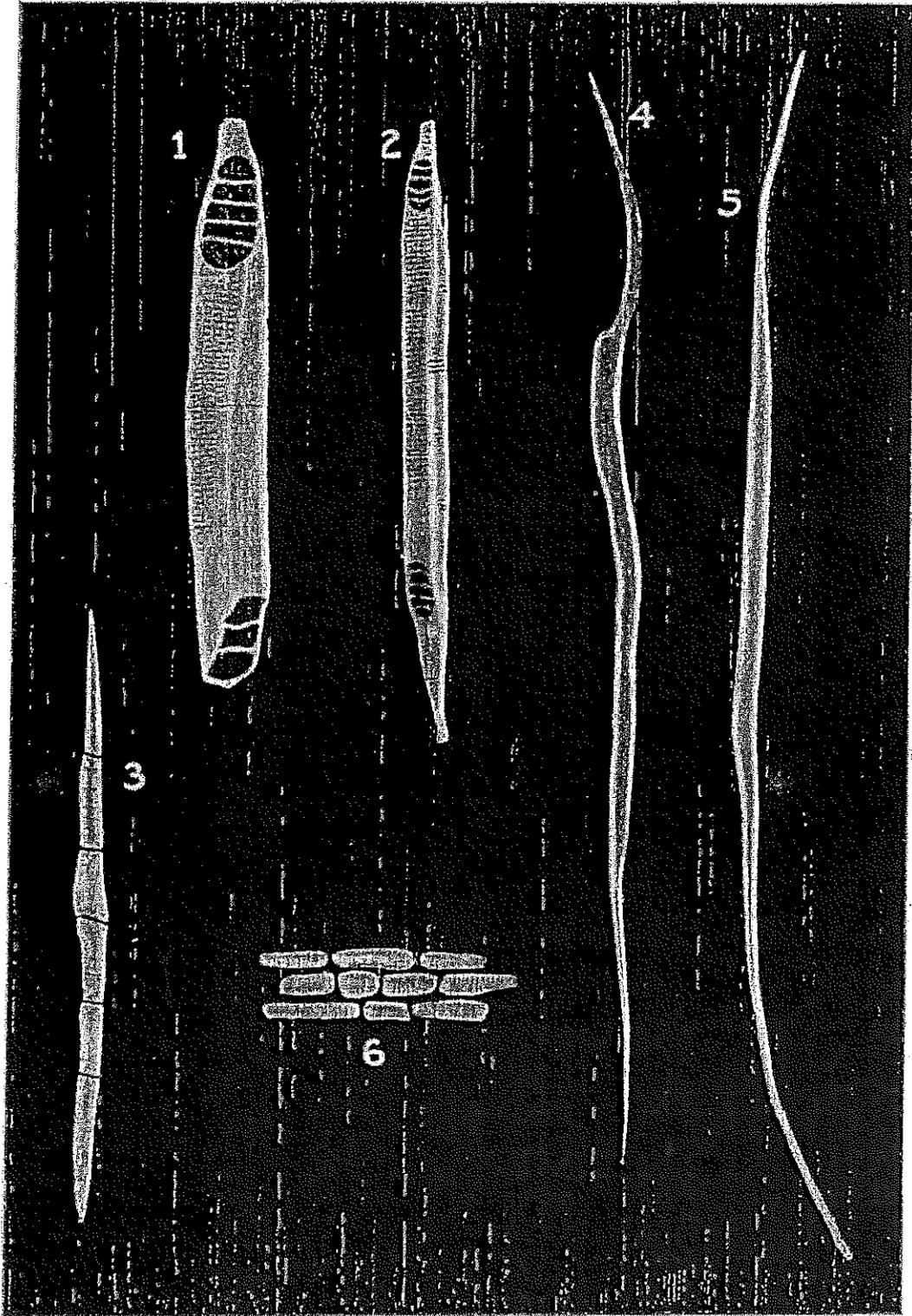
### Ray cell types



## SIMPLE AND SCALARIFORM PERFORATION PLATES

The composite end wall formed where adjoining end walls of two vessel elements have matching openings, or perforations, is called a perforation plate. A perforation plate is simple if it has a single large opening, scalariform if it has multiple, slotlike openings.





W. M. Harlow, New York State College of Forestry

**Bestandteile eines zerstreut-  
porigen Laubholzes**

Tulpenbaum

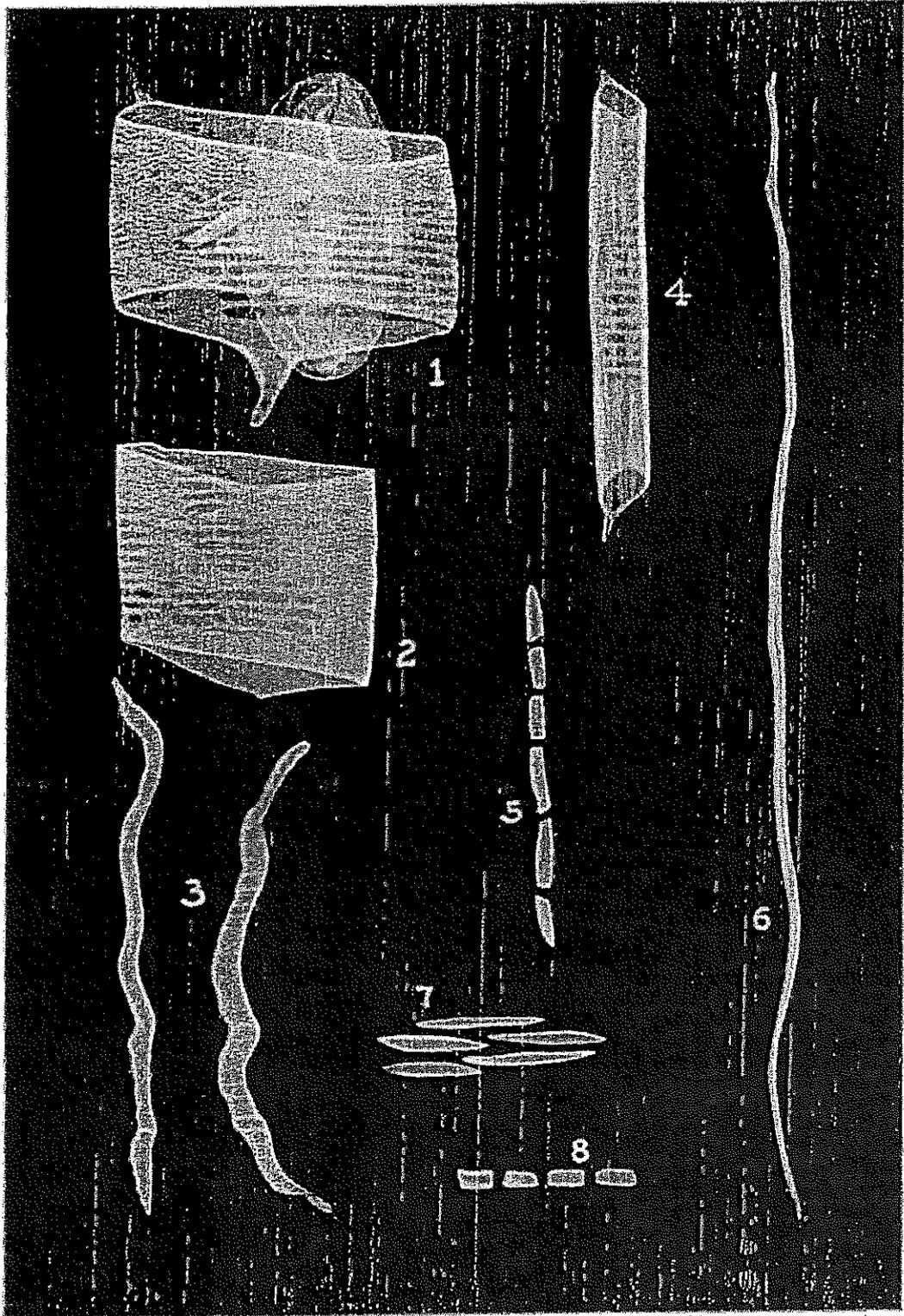
*Liriodendron tulipifera*

Vergr. x-77.

**Elements of a diffuse  
porous hardwood**

Yellow Poplar

1. Frühholzgefäß. 2. Spätholzgefäß (mit radialer und tangentialer Wandfläche).  
3. Längsparenchym. 4. und 5. Holzfasern. 6. Markstrahlparenchymzellen.



W. M. Harlow, New York State College of Forestry

**Bestandteile eines ringporigen  
Laubholzes**

Roteiche

**Elements of a ring porous  
hardwood**

Red oak

*Quercus rubra*  
Vergr. X-77.

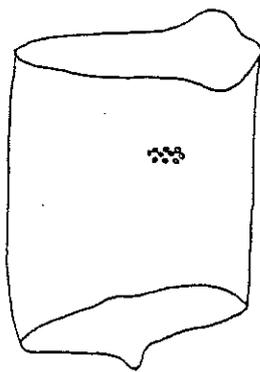
1. Ringförmiges Frühholzgefäß mit einer Thyllie (Thyllen sind selten im Roteichenholz).  
2. Zylindrisches Frühholzgefäß. 3. Tracheiden. 4. Röhrenförmiges Spätholzgefäß. 5. Längs-Parenchym. 6. Holzfaser. 7. Parenchymzellen aus zusammengesetztem Markstrahl. 8. Parenchymzellen eines einreihigen Markstrahls.

Beispiele Exemples

Eiche (Quercus robur L.): Mazerat **Éléments (macération) du Chêne**

Abbildungsmassstab 50 : 1

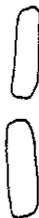
Echelle



Frühholz-  
Gefässglied  
**Élément de vaisseau  
du bois initial**



Spätholz  
**Élément du  
bois final**



Strangparenchymzellen  
**Cellules de parenchyme axial**



Markstrahlparenchym-  
zellen  
**Cellules de parenchyme de rayons**

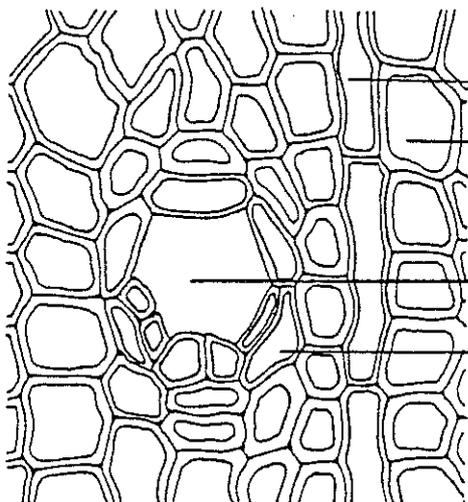


Faser  
**Fibre**

Lärche (Larix decidua Mill.): Querschnitt

Vergrößerung 450 x.

**Coupe transversale du Mélèze**



Markstrahl **Rayon ligneux**

Tracheide **Trachéide**

**Canal résinifère vertical**  
vertikaler Harzkanal

Harzkanalepithelzelle  
**Cellule épithéliale de canal rés.**

# TYPES DE CELLULES DES RESINEUX

## 1. DIE ZELLARTEN DES NADELHOLZES

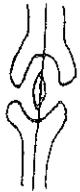
### ZELLARTEN

- NACH ZELLFORM: PARENCHYM  , PROSENCHYM 
- NACH ZELLWANDDICKE: PARENCHYM  , SKLERENCHYM  ,  
KOLLENCHYM 

**PARENCHYM** = LANGLEBIGE, BACKSTEINFÖRMIGE ODER ISODIAMETRISCHE, DÜNNWANDIGE ZELLEN MIT EINFACHEN TÜPFELN  
 FUNKTION : SPEICHERUNG UND VERTEILUNG ORGAN, STOFFE  
 VORKOMMEN : MARKSTRAHLEN, STRANGPARENCHYM, HARZKANAL-EPITHEL

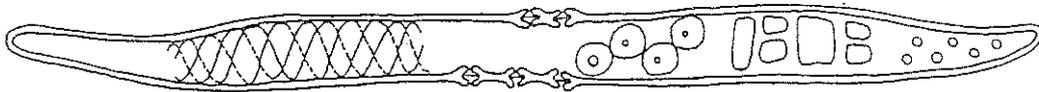


**PROSENCHYM** = KURZLEBIGE, DÜNN- ODER DICKWANDIGE ZELLEN MIT BEHÖFTEN TÜPFELN, FENSTERTÜPFELN (PINUS spp.) UND SCHRAUBENVERDICKUNGEN (TAXUS, PSEUDOTSUGA), SCHLITZFÖRMIGEN TÜPFELN  
 FUNKTION : WASSERLEITUNG UND FESTIGUNG  
 VORKOMMEN : LÄNGS- UND QUERTRACHEIDEN (= MARKSTRAHL-TRACHEIDEN), FRÜHHOLZ RESP. SPÄTHOLZ



*Tüpfel: siehe % Lbh.*

PARENCHYMZELLE:   $\updownarrow 20 - 40 \mu\text{m}$   $\longleftrightarrow 40 - 120 \mu\text{m}$   
 TRACHEIDE:  $\updownarrow 20 - 40 \mu\text{m}$   $\longleftrightarrow 1000 - 5000 \mu\text{m}$



$1 \mu\text{m (MIKROMETER)} = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$

MAZERAT = GEWEBE CHEMISCH IN ZELLEN AUFGELÖST

PRÄPARAT = GEWEBE MECHANISCH (SCHNEIDEN, SÄGEN) IN SCHNITTE (QUER, RADIAL, TANGENTIAL) ZERLEGT

## Types de cellules des Résineux

## *Zelltypen der Nadelhölzer*

1. Dessinez une partie de trachéide axiale de macération de Pin sylvestre (101). Indiquez des ponctuations aréolées (PA), la trace d'un rayon médullaire (TM), des ponctuations fenestriques (PF) ou pinoides et des petites ponctuations aréolées (pPA) entre trachéides axiales et trachéides de rayons.

1. *Zeichnen Sie einen Ausschnitt einer Längstracheide aus dem Mazerat der Waldföhre (101). Bezeichnen Sie Hoftüpfel (HT), eine Markstrahlspur (MS), Fenestertüpfel (FT) und kleine Hoftüpfel (kHT) zwischen Längs- und Markstrahltracheiden.*

3. Dessinez les extrémités de trachéides axiales du bois initial et du bois final de macération de Sapin de Douglas (102). Indiquez des ponctuations aréolées (PA), des renforcements spiralés (RS) et éventuellement des fissures obliques (FO) (le cas échéant). Respectez les différences de diamètre et d'épaisseur de paroi cellulaire (commentaire).

3. Zeichnen Sie die Zellenden je einer Früh- und Spätholztracheide aus dem Mazerat der Douglasie (102). Bezeichnen Sie Hoftüpfel (HT), Schraubenverdickungen (SV) und schraubenförmige Risse (SR) (falls vorhanden). Beachten Sie die Unterschiede beim Durchmesser und bei der Zellwanddicke (Kommentar).

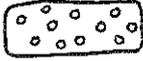
4: Dessinez les extrémités de trachéides axiales du bois initial et du bois final de macération de l'If (103). Indiquez des ponctuations aréolées (PA), des renforcements spiralés (RS) et éventuellement des fissures obliques (FO) (le cas échéant). Respectez les différences de diamètre et d'épaisseur de paroi cellulaire (commentaire).

4. *Zeichnen Sie die Zellenden je einer Früh- und Spätholztracheide aus dem Mazerat der Eibe (103). Bezeichnen Sie Hoftüpfel (HT), Schraubenverdickungen (SV) und schraubenförmige Risse (SR) (falls vorhanden). Beachten Sie die Unterschiede beim Durchmesser und bei der Zellwanddicke (Kommentar).*

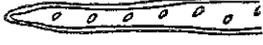
TYPES DE CELLULES DES FEUILLUS

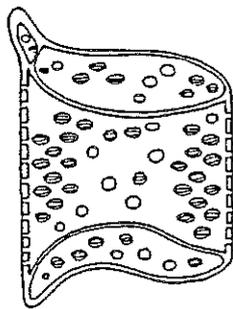
2. DIE ZELLARTEN DES LAUBHOLZES

PARENCHYM

- MARKSTRAHL- UND STRANGPARENCHYMZELLEN  (SPEICHERUNG UND VERTEILUNG ORGANISCHER STOFFE)

PROSENYM

- FASERN (FESTIGUNG, EINFACHE TÜPFEL) 
- FASERTRACHEIDEN (FESTIGUNG, HOFTÜPFEL) 
- VASKULARE TRACHEIDEN (WASSERLEITUNG, HT) 
- VASIZENTRISCHE TRACHEIDEN (KÜMMERFORM, HT) 
- TRACHEEN (= GEFÄSSE) BESTEHEND AUS GEFÄSSGLIEDERN (WASSERLEITUNG, INTERVASKULARE HOFTÜPFEL, KREUZUNGSFELDTÜPFEL, DURCHBRECHUNGEN, SCHRAUBENVERDICKUNGEN, DIFFERENZIERUNG FRÜHHOLZ - SPÄTHOLZ, FUNKTIONSENTHEBUNG DURCH VERSTOPFUNG)



FRÜHHOLZ

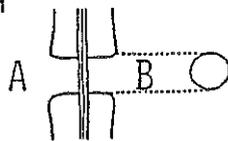


SPÄTHOLZ

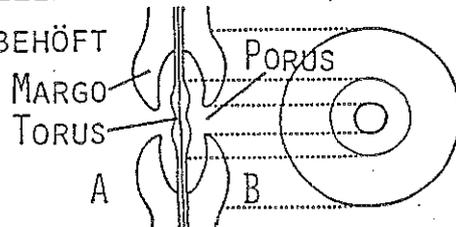
*gilt vor allem für Ndk.*

TUEPFELARTEN ZWISCHEN ZWEI ZELLEN (A UND B)

- EINFACH



- BEHÖFT



VERBINDUNGSART → TÜPFELART

PROSENYM-PROSENYM: HOFTÜPFEL (MIT AUSNAHMEN)

PARENCHYM - PARENCHYM: EINFACHE TÜPFEL

PARENCHYM - PROSENYM: KOMBINIERTE TÜPFEL, FENSTERTÜPFEL

6. Dessinez un élément de vaisseau du bois initial et du bois final, une trachéide et une cellule de parenchyme d'une macération de Chêne (152). Indiquez l'enplacement et l'angle (par rapport à l'axe) des perforations simples (PSi / a.droit; a.aigu). Respectez les proportions.

6. *Zeichnen Sie ein Früh- und ein Spätholzgefäßglied, eine Tracheide und eine Parenchymzelle aus dem Mazerat der Eiche (152). Bezeichnen Sie die Lage und den Winkel (zur Zellachse) der einfachen Durchbrechungen (ED / gerader W.; spitzer W.). Bewahren Sie die Massverhältnisse.*

7. Dessinez un élément de vaisseau d'une macération de Tilleul (154) et de Bouleau (155). Indiquez le type de perforation (P. simple / P. scalariforme). Dessinez les renforcements spiralés (RS) le cas échéant.

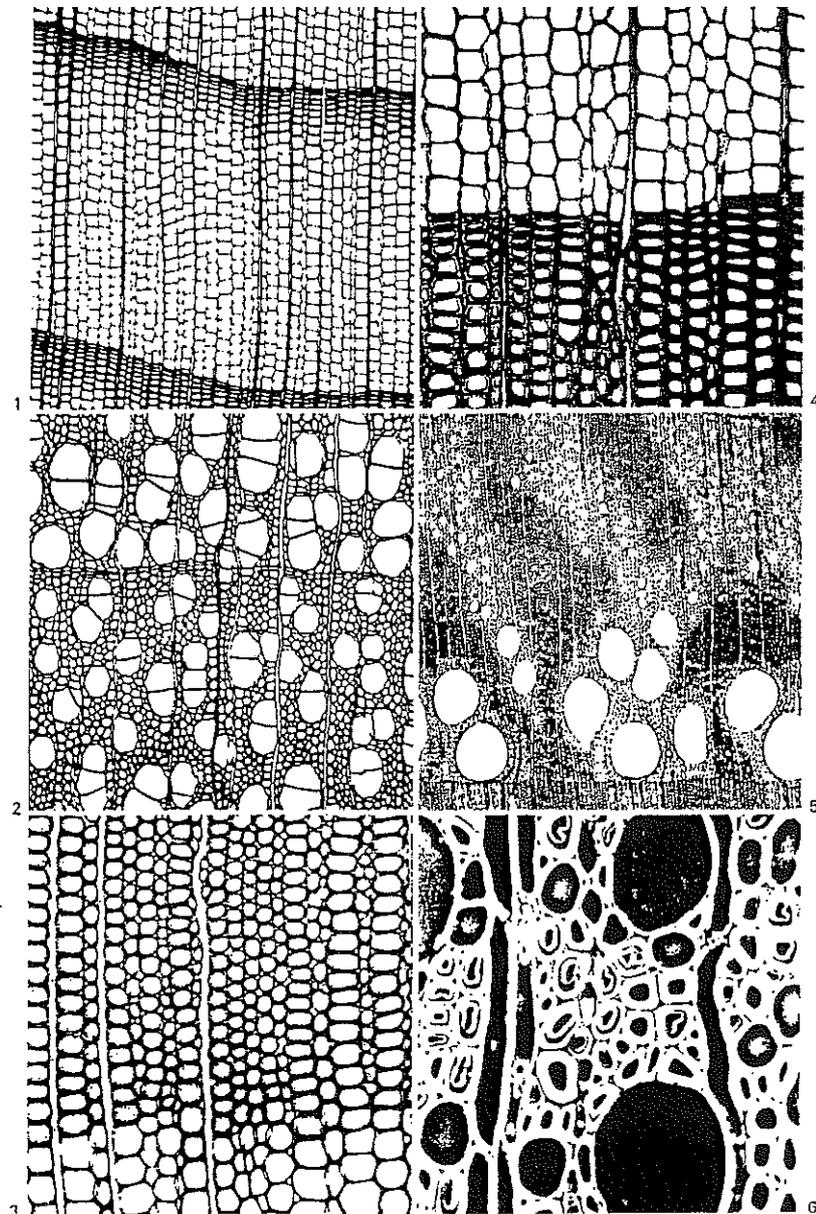
7. Zeichnen Sie ein Gefäßglied aus dem Mazerat der Linde (154) und der Birke (155). Bezeichnen Sie den Durchbruchstyp (einfache D. / leiterförmige D.). Zeichnen Sie Spiralverdickungen (SD) wenn vorhanden.

# Caractéristiques du tissu de soutien

## Merkmale des Stützgewebes

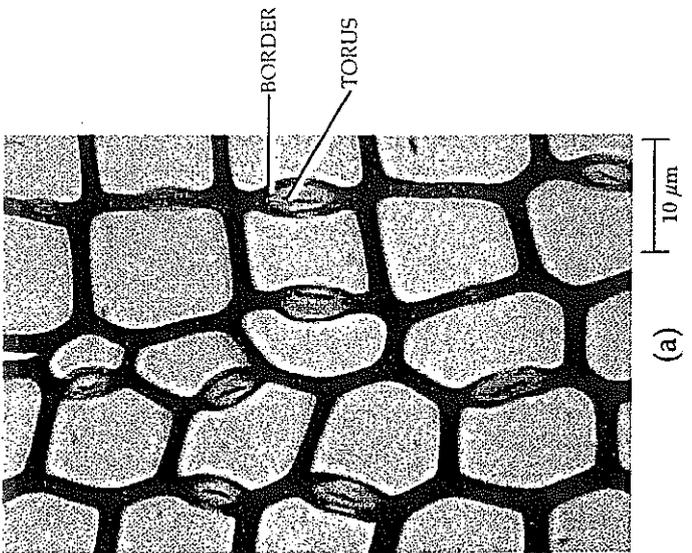
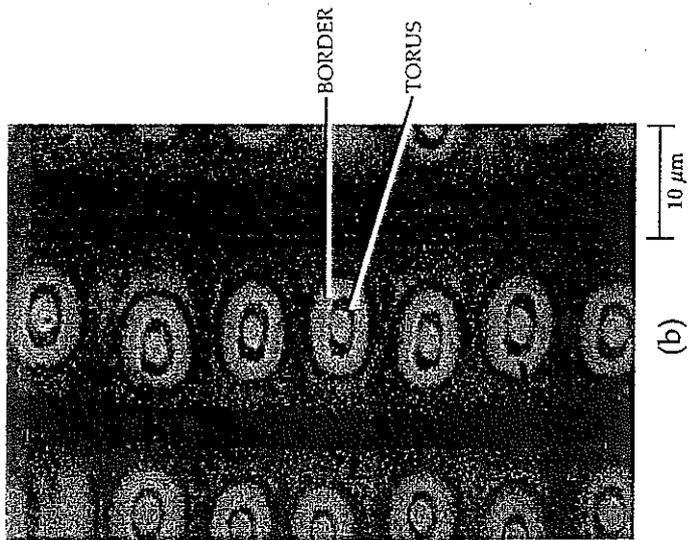
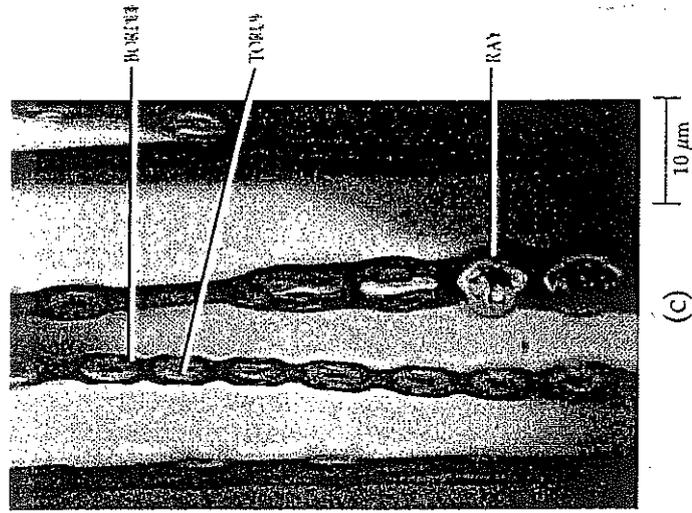
### Merkmale des Festigungsgewebes

- 1 *Abies alba*: Der Spätholzanteil ist in diesem Probenmaterial gering, die Tracheiden sind dünnwandig (Vergr. 43:1).
- 2 *Populus tremula*: In zerstreutporigen Laubbälzern ist keine Gliederung in Früh- und Spätholz vorhanden. Die Zellwände der Fasern sind über den ganzen Jahrring hinweg etwa gleich stark, die Zellformen der zuletzt differenzierten Fasern vereinfachen vom polygonalen Querschnitt zum rechteckigen (Vergr. 82:1).
- 3 *Larix decidua*: Im Druckholz sind die Tracheiden abgerundet und daher durch grössere Interzellularen voneinander getrennt. Die Zellwände sind dick und von Haarrissen durchsetzt (Vergr. 108:1).
- 4 *Abies alba*: Gut ausgebildetes Spätholz mit dickwandigen und gegen die Jahringgrenze zunehmend abgeplatteten Tracheiden (Vergr. 128:1).
- 5 *Quercus robur*: Im Spätholz ist eine radiale Zonierung zu beachten, hervorgerufen durch dichteres Festigungsgewebe, in welchem die Leitelemente meist fehlen (Vergr. 28:1).
- 6 *Fagus sylvatica*: Zugholz mit gelatinösen Zellen (Vergr. 654:1).



# Le tissu conducteur chez les résineux

## Das Leitgewebe bei den Nadelhölzern



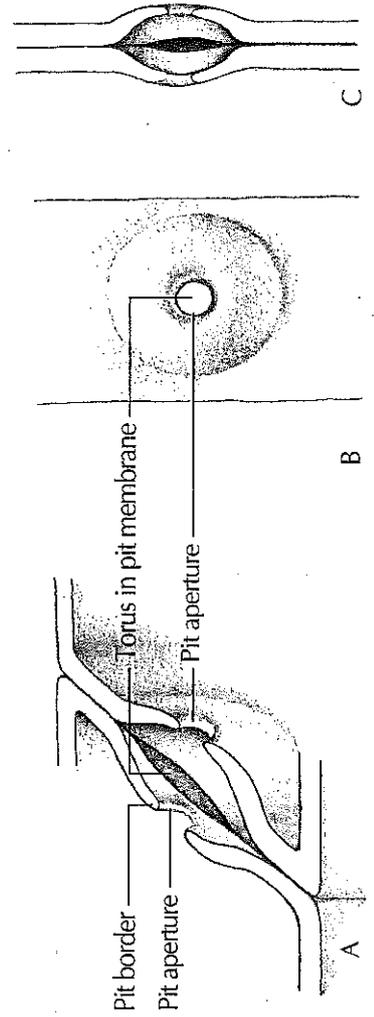
Details of white pine (*Pinus strobus*) wood. (a) Transverse section, showing bordered pit-pairs on radial walls of tracheids. (b) Radial section, showing the face view of bordered pit-pairs in walls of tracheids. (c) Tangential section, showing bordered pit-pairs of tracheids.

The rays of pine and other conifers are composed of ray tracheids and ray parenchyma cells. Here ray tracheids occur at the top and bottom of the ray and ray parenchyma cells in the middle. Notice the bordered pits of ray tracheids. Above the ray parenchyma are two adjacent bordered pit-pairs.

Raven et al., 1992

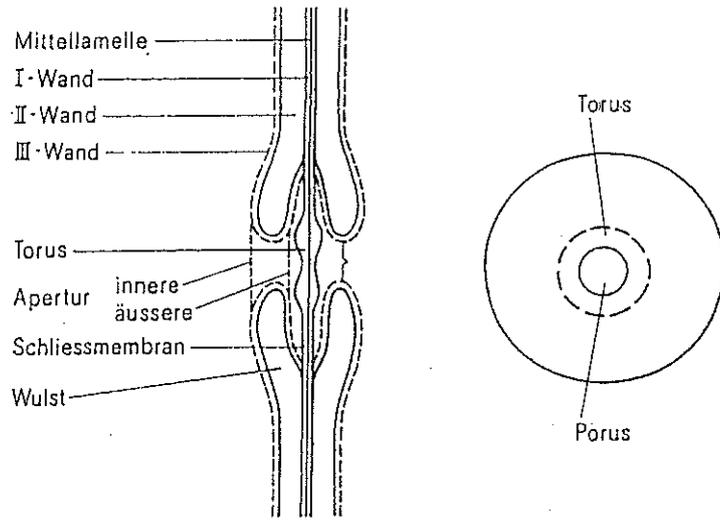
### BORDERED PITS

These bordered pit pairs typically form between two coniferous tracheids (A). In face view (B), they appear as doughlike structures. In sectional view (C), the domed borders are apparent. A half-bordered pit pair (D) is typically found where a bordered pit joins with the simple pit.



# La ponctuation aréolée et sa fonction

## Der Hoftüpfel und seine Funktion



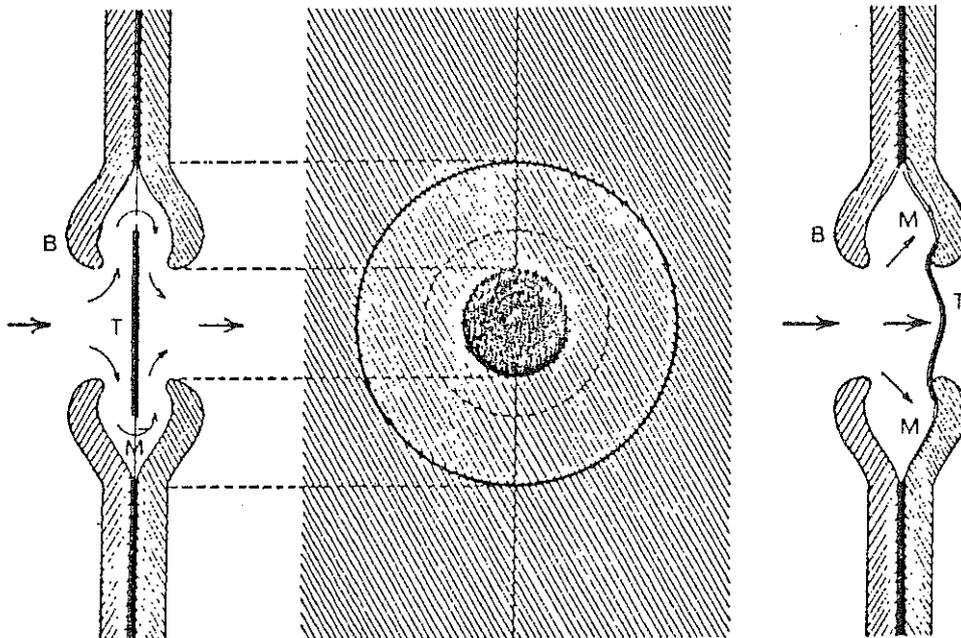
Strukturmerkmale von behöfteten Tüpfeln

**Behöfteter Tüpfel (Hoftüpfel):** Tüpfel, dessen sekundäre Wand sich von der Schliesshaut abhebt und sie als Randwulst (Hof) überwölbt.

**Tüpfelschliesshaut:** Bestandteil der interzellularen Schicht und der primären Zellwand, der die Tüpfelhöhle gegen aussen abschliesst. Ein zentraler, verdickter Teil der Tüpfelmembran wird als Torus bezeichnet. Bemerkung: ein Torus mit eingekerbtem Rand, wie bei Cedrus, heisst gekerbter Torus.

**Tüpfelhöhle:** der ganze innere Raum eines Tüpfels von der Schliesshaut bis zum Zellumen.

**Tüpfelöffnung (Apertur):** Öffnung oder Mündung eines Tüpfels.



## Übung 8

Zeichnen Sie stark vergrößert einen kleinen Ausschnitt aus dem Querschnitt von Weisstanne (200) beidseits der Jahringgrenze. Beachten Sie die Form, Grösse und Zellwanddicke der Tracheiden und die Lage der Hoftüpfel. Bezeichnen Sie auch einen Markstrahl.

Nach Abschluss der Übung 9, geben Sie die 3 wichtigsten Unterschiede zur Fichte (204) an:

- ...
- ...
- ...

Schnittrichtungen und Strukturen einer Föhrenart  
(*Pinus strobus* / Nadelholz)

- A:  
B:  
C:
- D:  
E:  
F:
- G:  
H:
- R / T:

Photos by Wilfried Costé

**PRINCIPAL SURFACES OF EASTERN WHITE PINE**

Cross-sectional (X), radial (R) and tangential surfaces of eastern white pine. The cube in the center has been magnified 25 times with an electron microscope. The large circular insets show typical hand-cut sections of these three surfaces magnified 75 times with a standard microscope. The small inset at the bottom shows the radial surface magnified 200 times. The letters correspond to features described in the text.

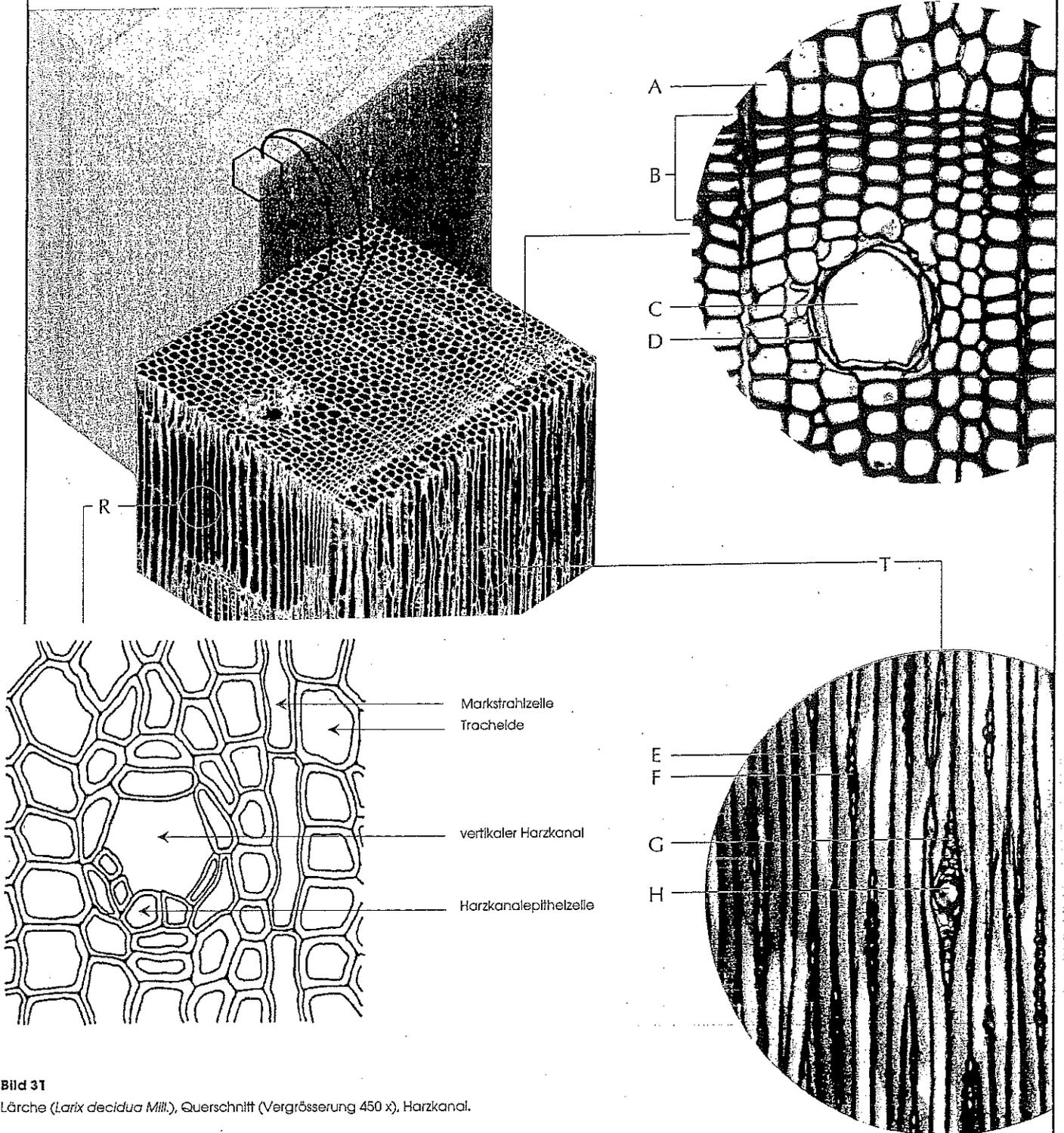


Bild 31

Lärche (*Larix decidua* Mill.), Querschnitt (Vergrößerung 450 x), Harzkanal.

## Übung 9

Zeichnen Sie stark vergrössert einen kleinen Ausschnitt aus dem Querschnitt von Fichte (204) beidseits der Jahrringgrenze, inklusive vertikaler Harzkanal. Beachten Sie die Form, Grösse und Zellwanddicke der Epithelzellen des Harzkanals.

Nach Abschluss der Übung 10, geben Sie die 3 wichtigsten Unterschiede zur Waldföhre (207) an:

- ...
- ...
- ...

## Übung 10

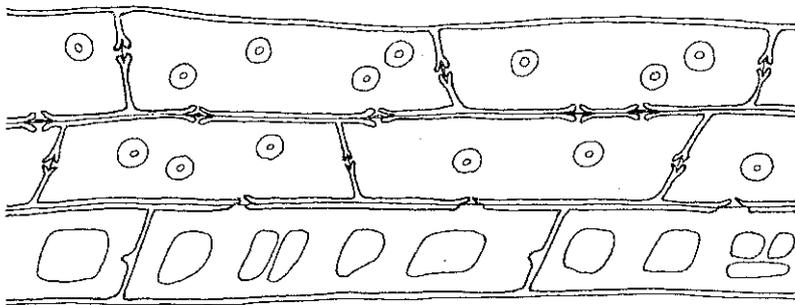
Zeichnen Sie stark vergrößert einen kleinen Ausschnitt aus dem Querschnitt von Waldföhre (207) beidseits der Jahrringgrenze, inklusive vertikaler Harzkanal. Beachten Sie die Form, Grösse und Zellwanddicke der Epithelzellen des Harzkanals.

Nach Abschluss dieser Übung, geben Sie die 3 wichtigsten Unterschiede zur Weisstanne (200) an:

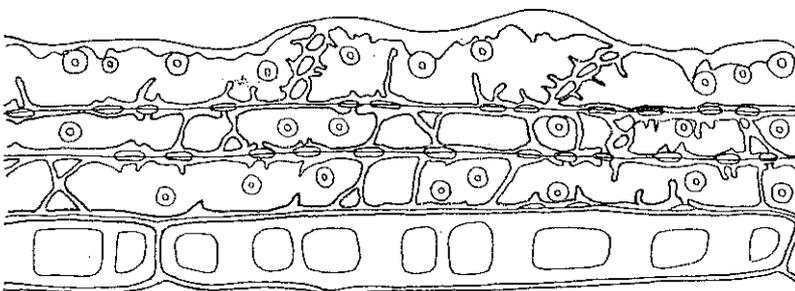
- ...
- ...
- ...

## Cellules de rayons ligneux (résineux)

### Zellen von Holzstrahlen (Nadelhölzer)



glatte  
Markstrahl-  
tracheiden  
z. B.  
in *Pinus strobus*  
*Pinus cembra*



gezähnte  
Markstrahl-  
tracheiden  
z. B.  
in *Picea abies*  
*Pinus silvestris*  
in *Pseudotsuga*  
auch mit  
Schrauben-  
verdickungen

Strukturmerkmale von Markstrahltracheiden

## Übung 11

Zeichnen Sie stark vergrößert einen kleinen Ausschnitt eines Markstrahls aus dem Radialschnitt von Waldföhre (207). Beachten Sie die zwei Zelltypen des Markstrahls (welche?), ihre Tüpfelung und ihre Wandbeschaffenheit.

Nach Abschluss dieser Übung, geben Sie die 3 wichtigsten Unterschiede zur Markstrahlstruktur der Fichte (204) an:

- ...
- ...
- ...

## Übung 12

Zeichnen Sie stark vergrößert das Detail eines Markstrahls mit horizontalem Harzkanal aus dem Tangentialschnitt von Fichte (204). Beachten Sie die Form, Grösse und Zellwanddicke der Epithelzellen dieses Harzkanals.

Nach Abschluss der Übung 10, geben Sie die 3 wichtigsten Unterschiede zur entsprechenden Struktur bei der Waldföhre (207) an:

- ...
- ...
- ...

# Les types de systèmes conducteurs chez les feuillus

## Die Leitgewebesysteme bei den Laubhölzern

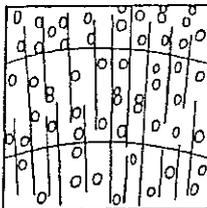
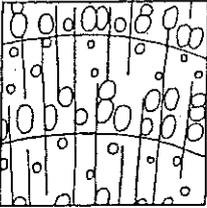
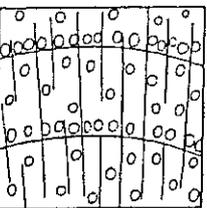
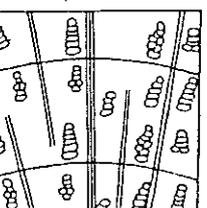
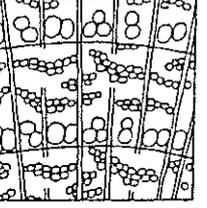
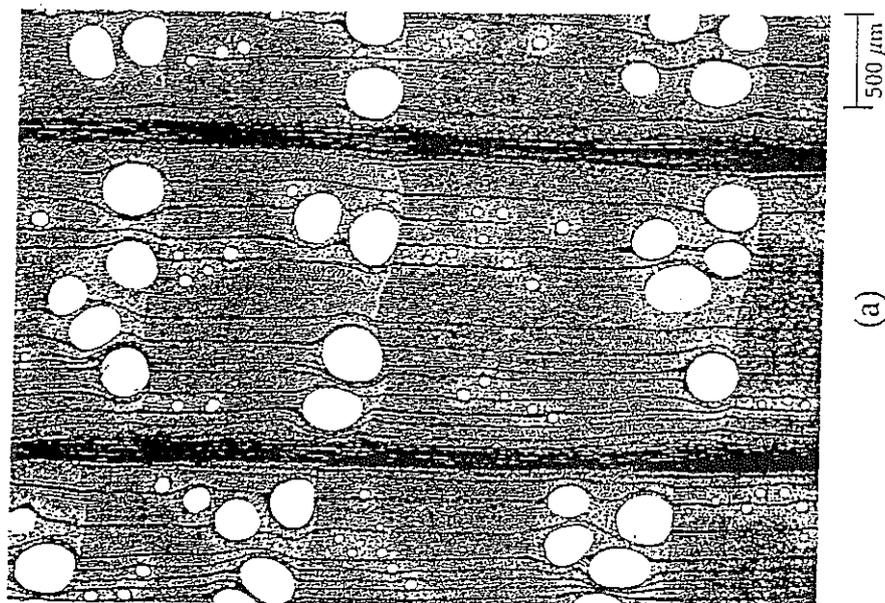
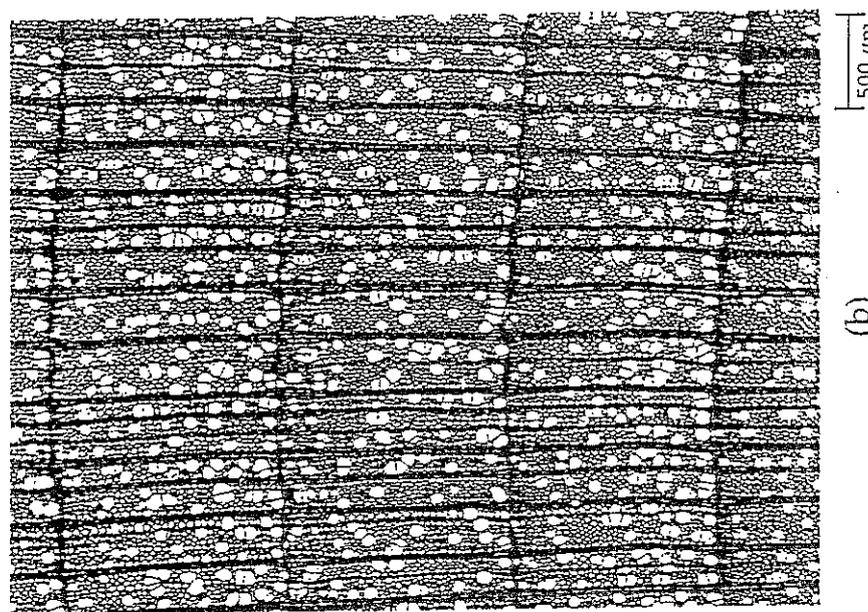
Bois à pores diffus		zerstreutporig ungleichmässige Verteilung der Gefässe im Jahrring; keine wesentlichen Unterschiede in den Gefässdurchmessern	<i>Fagus</i> <i>Carpinus</i> <i>Alnus</i> <i>Acer</i> <i>Betula</i> <i>Pinus</i> <i>Populus</i> <i>Salix</i>
Bois à zone poreuse		ringporig Frühholzgefässe in 2-3 tangentialen Reihen; im Durchmesser wesentlich (etwa 10mal) grösser als Späthholzgefässe	<i>Quercus</i> <i>Ulmus</i> <i>Fraxinus</i> <i>Robinia</i> <i>Castanea</i>
Bois à zone semi-poreuse		halbringporig längs Jahrringgrenze Gefässe in <i>einer</i> tangentialen Reihe; Durchmesser der Gefässe im ganzen Jahrring $\pm$ gleich	<i>Prunus avium</i> <i>Tilia</i> <i>Juglans</i>
Disposition radiale des vaisseaux		radiale Anordnung von Gefässen	<i>Ilex</i> <i>Alnus</i> <i>Populus</i>
Disposition tangentielle des vaisseaux		tangentielle Anordnung von Gefässen	<i>Ulmus</i> <i>Celtis</i>

Abbildung 14 Merkmale der Wasserleitgewebe im Laubholz  
Caractéristiques du système conducteur des feuillus

## Secondary Growth in Stems



(a)



(b)

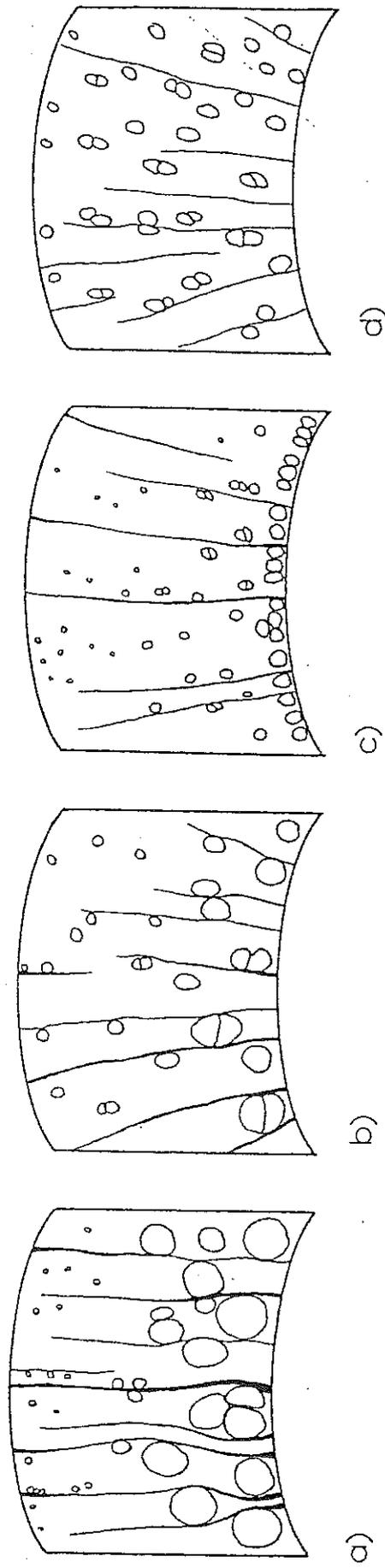
Transverse sections of wood, showing growth layers. (a) Red oak (*Quercus rubra*). The large vessels of ring-porous wood such as red oak are found in the early wood. The dark vertical lines are rays. (b) Tulip tree (*Liriodendron tulipifera*), a diffuse-porous wood.

Le tissu conducteur chez les feuillus

Das Leitgewebe bei den Laubhölzern

## Diamètres des vaisseaux selon les types de porosité

### Gefäßdurchmesser nach Porigkeitstypen



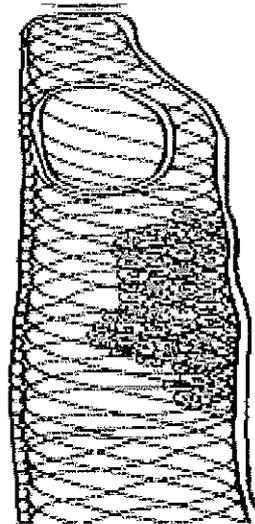
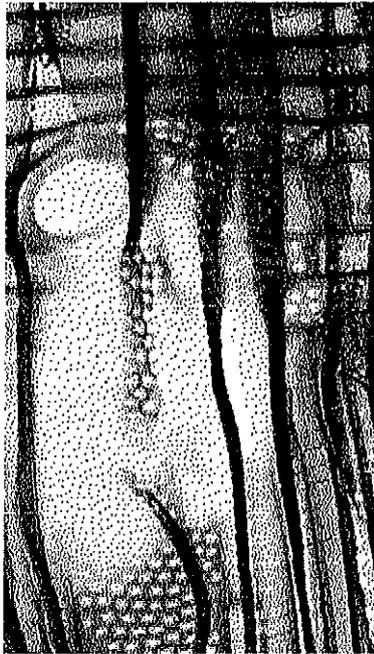
Schematische Darstellung der Gefäßdurchmesser im Jahring ringporiger (a), halbringporiger (b und c) und zerstreutporiger (d) Laubholzarten im Querschnitt.

# Gefässdurchbrechungen: einfach oder leiterförmig

*Perforations de vaisseaux: simples ou scalariformes*

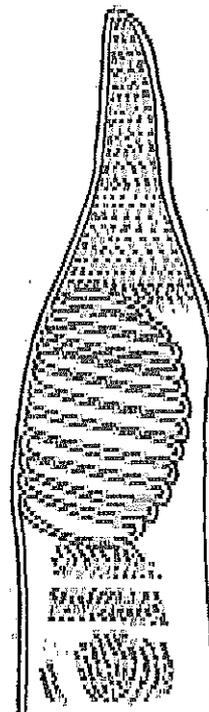
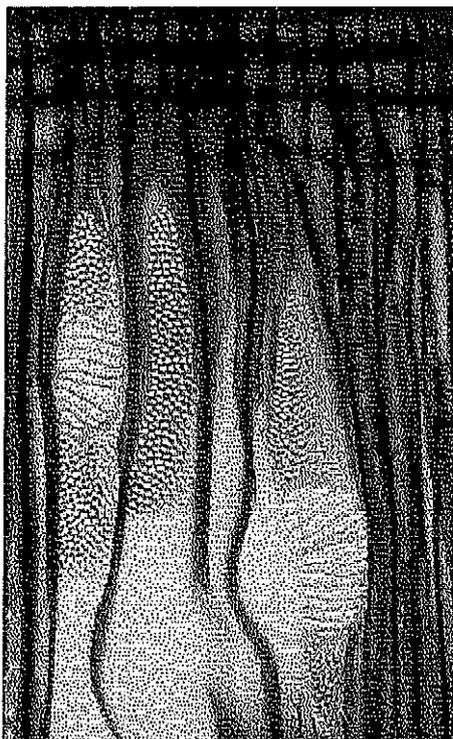
Einfach / simples

[Radialschnitt / coupe radiale]



Leiterförmig / scalariformes

[Radialschnitt / coupe radiale]



### Übung 13

Zeichnen Sie mit mittlerer Vergrößerung einen kleinen Ausschnitt aus dem Querschnitt von Ahorn (301) über einen schmälere Jahrring (von Jahrringgrenze zu Jahrringgrenze), zwischen zwei Markstrahlen. Beachten Sie die Grösse, Gruppierung und Verteilung der Gefässe, sowie die Breite der Markstrahlen (wieviel Zellen?).

Nach Abschluss dieser Übung, geben Sie die 3 wichtigsten Unterschiede zur Buche (303) an:

- ...
- ...
- ...

## Übung 14

Zeichnen Sie mit mittlerer Vergrößerung einen kleinen Ausschnitt aus dem Querschnitt von Buche (303) über einen schmälere Jahrring (von Jahrringgrenze zu Jahrringgrenze), zwischen zwei Markstrahlen. Beachten Sie die Grösse, Gruppierung und Verteilung der Gefässe, sowie die Breite der Markstrahlen (wieviel Zellen?).

Nach Abschluss dieser Übung, geben Sie die 3 wichtigsten Unterschiede zur Eiche (312) an:

- ...
- ...
- ...

## Übung 15

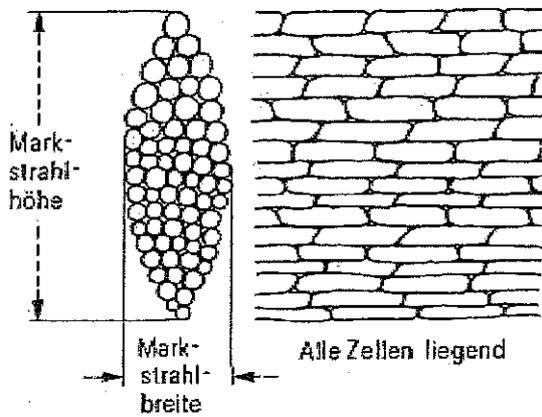
Zeichnen Sie mit mittlerer Vergrößerung einen kleinen Ausschnitt aus dem Querschnitt von Eiche (312) über einen schmäleren Jahrring (von Jahrringgrenze zu Jahrringgrenze), zwischen zwei Markstrahlen. Beachten Sie die Grösse, Gruppierung und Verteilung der Gefässe, sowie die Breite der Markstrahlen (wieviel Zellen?).

Nach Abschluss dieser Übung, geben Sie die 3 wichtigsten Unterschiede zum Ahorn (301) an:

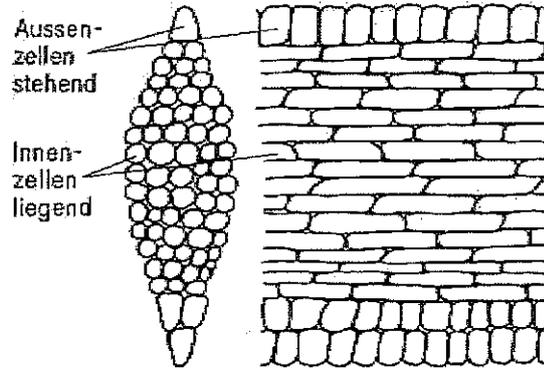
- ...
- ...
- ...

# Holzstrahlen: homogen oder heterogen

*Rayons ligneux: homogènes ou hétérogènes*

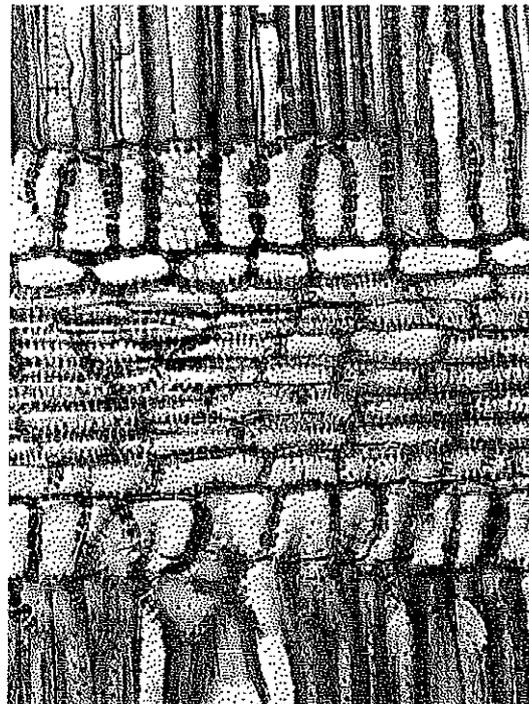
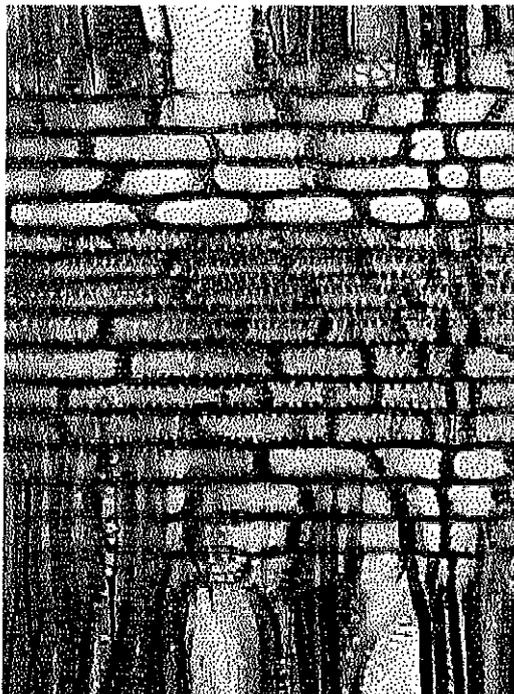


**homogener Markstrahl:**  
Zellachsen der Aussen- und Innenzellen  
laufen parallel der Markstrahlachse  
Beispiel: *Acer*



**heterogener Markstrahl:**  
Achsen der Aussenzellen stehen senkrecht  
auf Markstrahlachse; im Innern verlaufen  
Zellachsen und Markstrahlachse gleich-  
sinnig  
Beispiel: *Hex*

Homogen / homogène [Radialschnitt / coupe radiale] Heterogen / hétérogène



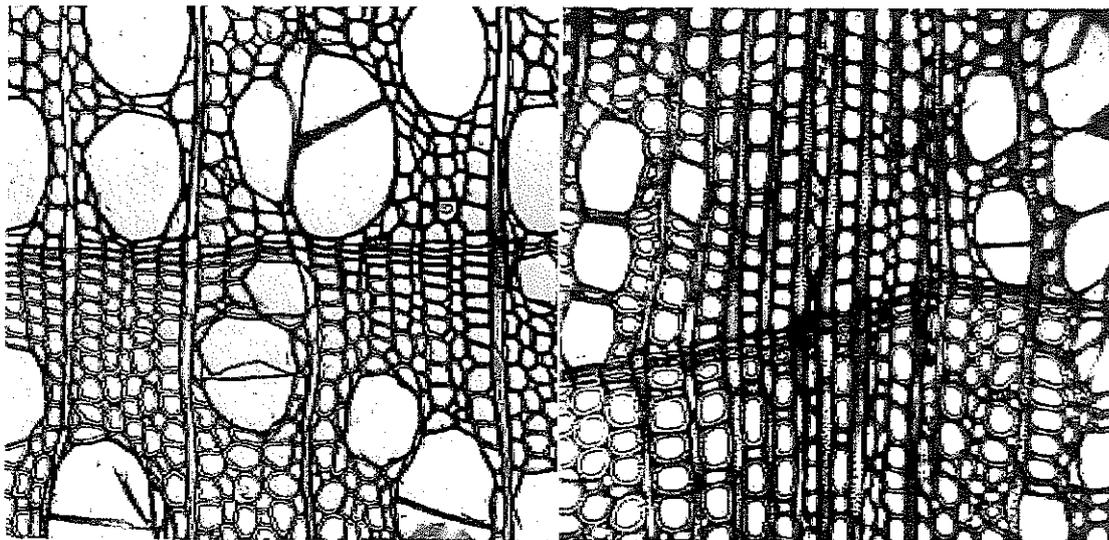
**Holzstrahlen: normal oder zusammengesetzt (« Schein-MS »)**

*Rayons ligneux: normaux ou composés (agrégés, « faux rayons »)*

Normal einreihig / normaux unisériés

Zusammengesetzt / composés

[Querschnitt / coupe transversale]

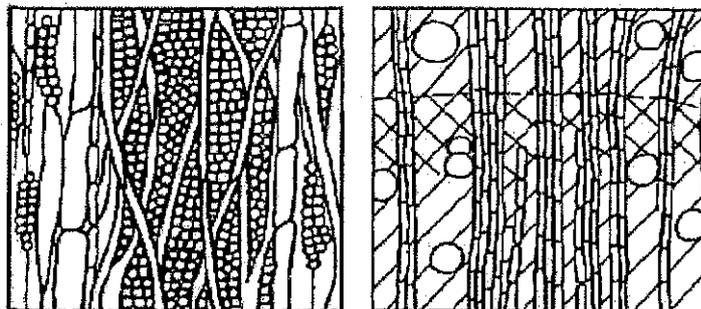


Schema Zusammengesetzt HS / RL composé

(T.S.)

*Carpinus*

(Q.S.)



Scheinmarkstrahlen (z. B. in *Carpinus* und *Alnus*): Zone mit Häufung von kleinen Markstrahlen, welche nur durch Fasergrundgewebe, nicht aber durch Gefäßstränge voneinander getrennt sind

(aus Bosshard 1982)

MIKROMERKMALE MITTELEUROPÄISCHER NADELHÖLZER

Merkmal	<i>Abies alba</i>	<i>Larix decidua</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus cembra</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus strobus</i>	<i>Pseudotsuga taxifolia</i>	<i>Taxus baccata</i>
Längstracheiden mit Schraubenverdickungen	-	-	-	-	-	-	+ flach	+ steil
Markstrahltracheiden vorhanden	-	+	+	+	+	+	+	-
Markstrahltracheiden gezähnt	-	-	+	-	+	-	-	-
Markstrahlparenchymzellen mit Einkerbungen	+	+	+	-	-	-	(+)	(+)
Kreuzungsfeldtüpfel 1-3, einfache grosse Tüpfel	-	-	-	+	+	+	-	-
Kreuzungsfeldtüpfel piceoid	-	+	(+)	-	-	-	+	-
Kreuzungsfeldtüpfel cupressoid	-	-	(+)	-	-	-	-	+
Kreuzungsfeldtüpfel taxodioid	+	-	-	-	-	-	-	-
Vertikale Harzkanäle vorhanden	-	+	+	+	+	+	+	-
Horizontale Harzkanäle vorhanden	-	+	+	+	+	+	+	-
Epithelzellen dickwandig	-	+	+	-	-	-	+	-
5-6 Epithelzellen im Tangentialschnitt	-	-	-	-	-	-	+	-
7-12 Epithelzellen im Tangentialschnitt	-	+	+	-	-	-	-	-

Bemerkung: Merkmal in Klammer = undeutlich oder unregelmässig vorkommend.

FEUILLUS

(aus Bosshard 1982)

MIKROMERKMALE MITTELEUROPÄISCHER LAUBHÖLZER

Merkmal	<i>Acer spec.</i>	<i>Aesculus spec.</i>	<i>Alnus spec.</i>	<i>Betula spec.</i>	<i>Buxus spec.</i>	<i>Carpinus spec.</i>	<i>Castan<del>ea</del> spec.</i>	<i>Corylus spec.</i>
Gefässanordnung: ringporig = rp / halbringporig = hrp / zerstreutporig = zp	zp	zp	zp	zp	zp einzeln	zp	rp	zp
Gefässe im Querschnitt in radialen Gruppen	(+)	+	+	(+)	-	+	-	+
Gefässdurchbrechungen: einfach = e / leiterförmig = l	e	e	l	l	l	e	e	l
Gefässwände mit Schraubenverdickungen	+	+	-	-	-	+ fein	-	-
Intervaskuläre Tüpfel leiterförmig	-	-	-	- sehr klein	- sehr klein	-	-	-
Markstrahlen homogen	+	+	+	+	-	(+)	+	-
Markstrahlbreite im Tangentialschnitt	1-8	1	1	1-5	1-3	1-8	1	1-3 - (12)
Markstrahlen im Tangentialschnitt häufig über 1mm hoch	-	-	-	-	-	-	-	-
Zusammengesetzte Markstrahlen vorhanden	-	-	+	-	-	+	-	+
Parenchym prädominant apotracheal	+ spärlich	-	+	+	(+)	+	+	+
Parenchym prädominant paratracheal	-	+ spärlich	-	-	(+)	-	-	-
Parenchym diffus	+	-	+	+	+	+	+	+ spärlich
Parenchym vasizentrisch (augenförmig = af)	-	-	-	-	-	-	(+)	-
Parenchym gebändert	-	- terminal	-	-	-	(+)	-	-

Bemerkung: Merkmal in Klammer = undeutlich oder unregelmässig vorkommend.

(Fortsetzung)

## MIKROMERKMALE MITTELEUROPÄISCHER LAUBHÖLZER

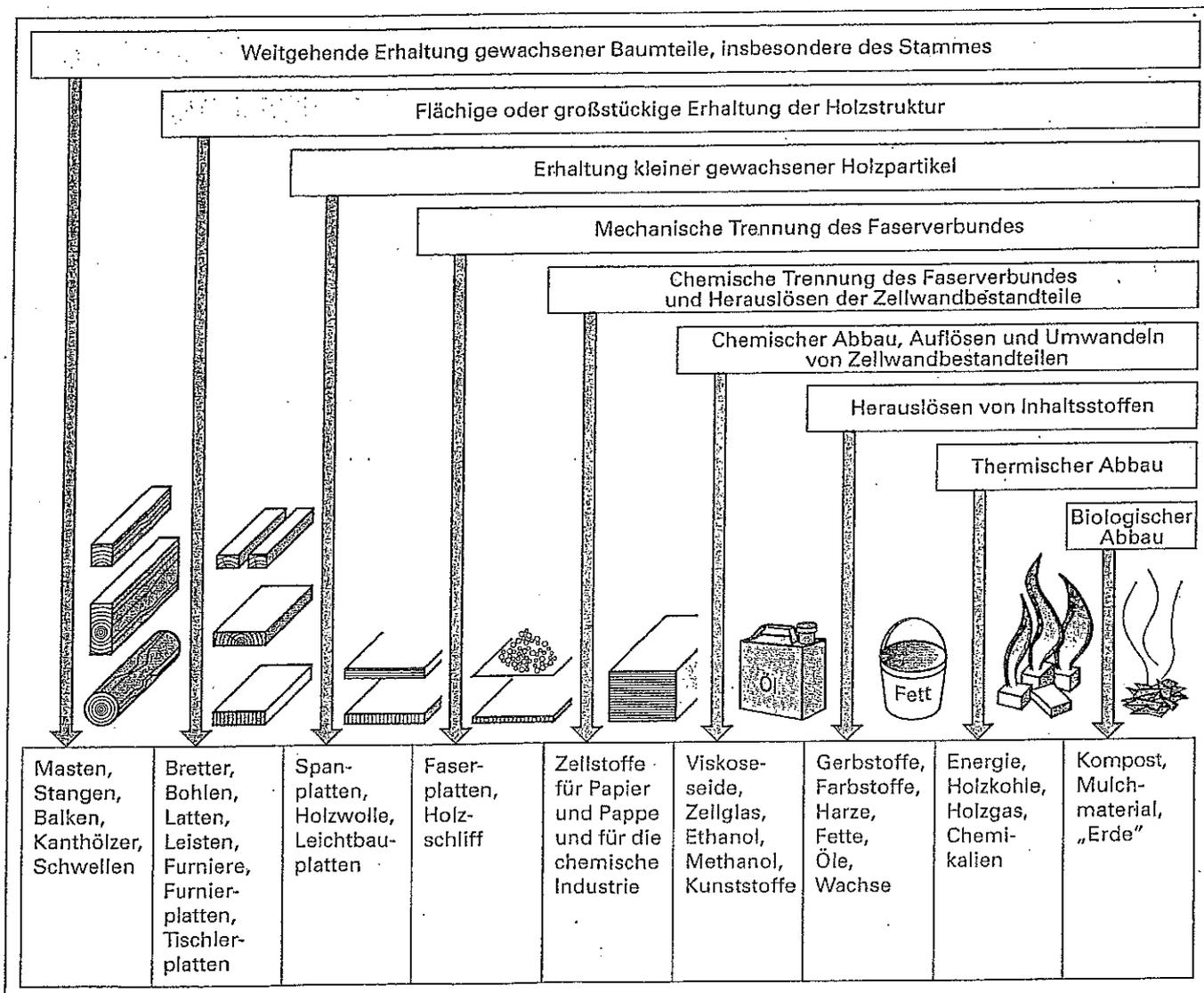
Merkmal	<i>Crataegus</i> spec.	<i>Fagus</i> spec.	<i>Fraxinus</i> spec.	<i>Ilex</i> spec.	<i>Juglans</i> spec.	<i>Magnolia</i> spec.	<i>Ostrya</i> spec.	<i>Pyrus</i> spec.
Gefässanordnung: ringporig = rp / halbringporig = hrp / zerstreutporig = zp	zp	zp	rp	zp	hrp	zp	zp	zp (einzeln)
Gefässe im Querschnitt in radialen Gruppen	-	-	-	+	(+)	(+)	+	-
Gefässdurchbrechungen: einfach = e / leiterförmig = l	e	l (e)	e	l	e	l	e	e
Gefässwände mit Schraubenverdickungen	+	-	-	+	-	+	+	-
Intervaskuläre Tüpfel leiterförmig	-	(+)	-	-	-	+	-	-
Markstrahlen homogen	+	-	+	-	(+)	(+)	(+)	+
Markstrahlbreite im Tangentialschnitt	1-4	1->10	1-4	1-9	1-4	1-3	1-4	1-4
Markstrahlen im Tangentialschnitt häufig über 1mm hoch	-	+	-	+	-	-	-	-
Zusammengesetzte Markstrahlen vorhanden	-	-	-	-	-	-	(+)	-
Parenchym prädominant apotracheal	+	+	-	+	(+)	+	+	+
Parenchym prädominant paratracheal	-	-	+	-	(+)	-	-	-
Parenchym diffus	+	+	-	+	+	-	+	+
Parenchym vasizentrisch (augenförmig = af)	-	-	+ af	-	(+) spärlich	-	-	-
Parenchym gebändert	+	-	-	-	-	+ terminal	(+)	-

Merkmal	<i>Platanus</i> spec.	<i>Populus</i> spec.	<i>Prunus</i> spec.	<i>Quercus</i> spec.	<i>Robinia</i> spec.	<i>Salix</i> spec.	<i>Tilia</i> spec.	<i>Ulmus</i> spec.
Gefässanordnung: ringporig = rp / halbringporig = hrp / zerstreutporig = zp	zp	zp	hrp	rp	rp	zp	hrp	rp
Gefässe im Querschnitt in radialen Gruppen	-	-	+	-	-	(+)	-	-
Gefässdurchbrechungen: einfach = e / leiterförmig = l	e (1)	e	e	e	e	e	e	e
Gefässwände mit Schraubenverdickungen	-	-	+	-	+	-	+	+ fein
Intervaskuläre Tüpfel leiterförmig	(+)	-	-	-	-	-	-	-
Markstrahlen homogen	(+)	+	-	+	+	-	(+)	+
Markstrahlbreite im Tangentialschnitt	1->10	1	1-5	1-2 u >10	1-7	1	1-4	1-6
Markstrahlen im Tangentialschnitt häufig über 1mm hoch	+	-	-	+	-	-	+	-
Zusammengesetzte Markstrahlen vorhanden	-	-	-	-	-	-	-	-
Parenchym prädominant apotracheal	(+)	+	+	+	-	+	+	-
Parenchym prädominant paratracheal	(+)	-	-	-	+	-	-	+
Parenchym diffus	+	-	+ spärlich	+	-	-	+	-
Parenchym vasizentrisch (augenförmig = af)	-	-	-	-	+ af	-	-	+
Parenchym gebändert	-	- terminal	-	+	-	- terminal	-	(+)

**Bemerkung:** Merkmal in Klammer heisst undeutlich oder unregelmässig vorkommend.

# Holz als Chemie-Rohstoff im Vergleich mit anderen Möglichkeiten der Holzverwertung

(Aus: Holztechnik Fachkunde, Europa-Lehrmittel 1999)



Möglichkeiten einer vollständigen Holzverwertung

# Chemie des Holzes

## Elementarzusammensetzung des Holzes

Holz besteht überwiegend aus organischen Verbindungen. Diese organischen Verbindungen basieren vorwiegend auf 4 chemischen Elementen: C, O, H, N. Verhältnismässig besteht das Holz zu

50 % aus Kohlenstoff (C)  
43 % aus Sauerstoff (O)  
6 % aus Wasserstoff (H)  
< 1 % aus Stickstoff (N)

Die Zusammensetzung schwankt baumartenweise und innerhalb eines Stammes geringfügig, wie es zum Beispiel auch zwischen Stamm und Zweigen zu sehen ist. Nicht der Prozentsatz der chemischen Elemente, sondern die unterschiedliche chemische Bindung der genannten Elemente bewirkt die Unterschiede der Eigenschaften bei der Holzverwendung. Vom Stickstoffgehalt wird auf die Dauerhaftigkeit des Holzes geschlossen, da Stickstoff vorwiegend als Eiweiß gebunden wird und Eiweiß häufig die Ernährungsgrundlage für Holzzerstörer bildet. Der Kohlenstoffgehalt ist überall dort von Interesse, wo es um Verbrennung, Verkohlung und Vergasung des Holzes geht.

## Chemische Hauptgruppen

Aus den genannten Elementen sind auch die drei Hauptbaustoffe des Holzes zusammengesetzt:

Cellulose ca. 45 %  
Holzpolyosen (Hemizellulosen) ca. 22 % (18-27%)  
Lignin ca. 26 % (22-30%)

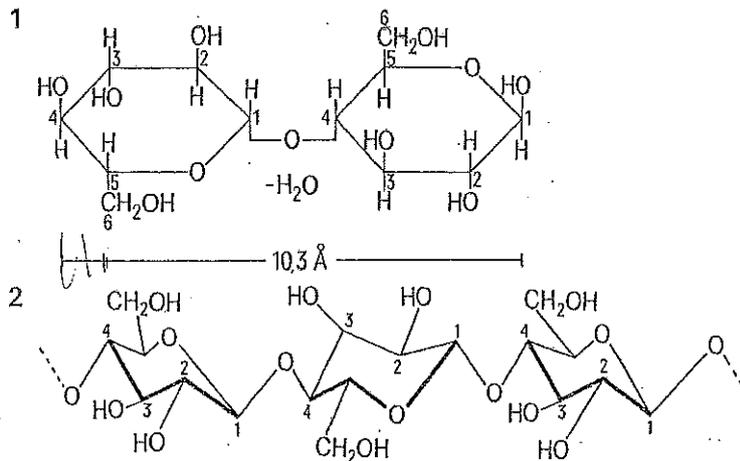
sowie aus Nebenbestandteilen, sogenannten akzessorischen Bestandteilen. Die Anteile der chemischen Hauptgruppen in Gewichtsprozenten unterscheiden sich bei den einheimischen Holzarten nur wenig. Jeweilige Höchstwerte sind bei Pappel (56,5%), Birke (27,1%) und Fichte (30,0%) zu erkennen. Der Anteil von Lignin ist bei Nadelhölzern etwas höher als bei den wichtigsten einheimischen Laubhölzern. Der Ligningehalt der Exoten liegt z. T. beträchtlich höher als bei einheimischen Holzarten.

### Cellulose

Cellulose bildet die Gerüstsubstanz der jungen, unverholzten Zellwand. Sie besteht aus einem fadenförmigen Makromolekül, welche aus d-Glukose-Einheiten aufgebaut ist, wie eingangs erwähnt ca. 45% ausmachend. Diese Glukose-Einheiten werden durch den Prozess der Photosynthese mit Hilfe der Energie des Sonnenlichtes, des Bodenwassers und des Kohlendioxyds der Luft gebildet. Die Cellulose besteht aus:

49 % Sauerstoff  
 45 % Kohlenstoff  
 6 % Wasserstoff

Das Makromolekül der Cellulose besteht aus dem Glukoserest (Kohlehydrat)  $C_6H_{10}O_5$  mit drei Hydroxylgruppen, aneinandergehängt (Polymer).



Darstellung der Zellobiose-Einheit (1) und der «Sesselform» (2) der Zellulose. Durch Verdrillung um  $180^\circ$  kommen in zwei benachbarten  $\beta$ -Glukosemolekülen am ersten und vierten C-Atom die OH-Gruppen in korrespondierende Stellung. Dadurch wird Polymerisation unter Wasseraustritt möglich ( $\beta$ -glukosidische Bindung unter Ätherbrückenbildung). – In der Zellobioseeinheit liegen die C-Atome in den beiden Glukoseresten nicht in der gleichen Ebene, wie dies im Schema 1 gezeichnet ist. Wahrscheinlich kommt die in 2 gezeigte Sesselform den wirklichen Verhältnissen am nächsten (nach E. TREIBER 1957).

Ein hoher Polymerisationsgrad (1000 bis 5500) bewirkt die besondere Struktur der Cellulose und ist die Voraussetzung für den Aufbau eines gerichteten, elastischen und zugfesten Zellwandgerüsts. Unter Polymerisationsgrad wird die durchschnittliche Anzahl der Anhydroglukose-Einheiten je Makromolekül verstanden, z. B.:

Birke	5500
Kiefer, Aspe	5000
Fichte, Buche	4000

Der Polymerisationsgrad sinkt durch die Einwirkung von Licht (UV-Strahlen), Chemikalien und Fermenten. Liegt der Polymerisationsgrad unter 200, so hat die Cellulose keine Fasereigenschaften (mit Zugfestigkeit) mehr.

## Holzpolyosen (Hemizellulosen)

Die Zellmembranen enthalten außer Cellulose noch andere Kohlehydrate. Sie wurden früher unter dem Sammelbegriff Hemicellulosen zusammengefaßt, heute heißen sie Holzpolyosen, wie eingangs erwähnt sind es ca. 22%. Die Holzpolyosen unterscheiden sich von der Reincellulose dadurch, daß sie sich leichter hydrolysieren (Spalten durch wässriger Säureeinwirkung) lassen und ihr Durchschnittspolymerisationsgrad nur bei 70 bis 150 liegt.

Holzpolyosen sind Polysaccharide, zu ihnen gehören unter anderen Pentosane, Hexosane, und amorphe Polyosen. (Pentosane = Zucker mit 5 Kohlenstoffatomen; Hexosane = Zucker mit 6 Kohlenstoffatomen)

Die Laubhölzer sind im wesentlichen aus Pentosanen aufgebaut, die Nadelhölzer aus Hexosanen mit Ausnahme von Lärchenholz. Die Aufgaben der Holzpolyosen in der Zellwand sind verschieden:

- stützende Stoffe im Zellwandgerüst
- Reservestoffe
- als Quellstoffe steuern sie die Durchlässigkeit der Membran
- als Klebstoff sorgen sie für die Verkittung der Zellmembran

Die Holzpolyosen haben unterschiedliche Bedeutung bei der Holzverwendung im Bereich der Platten- und Zellstoffproduktion. Beim Dämpfen oder Kochen des Holzes als Vorbehandlung zur Herstellung von Faserplatten, Braunschiff und zur Furnierherstellung werden die Holzpolyosen mit den Kondensaten und Abwässern der stofflichen Nutzung entzogen. Bei Papierzellstoffen ist aber ein hoher Anteil an Holzpolyosen erwünscht wegen

- höherer Ausbeute.

Bei der Herstellung von Textilzellstoff (Viskose) sind Holzpolyosen wegen des erhöhten Chemikalienverbrauch nicht erwünscht.

## Lignin

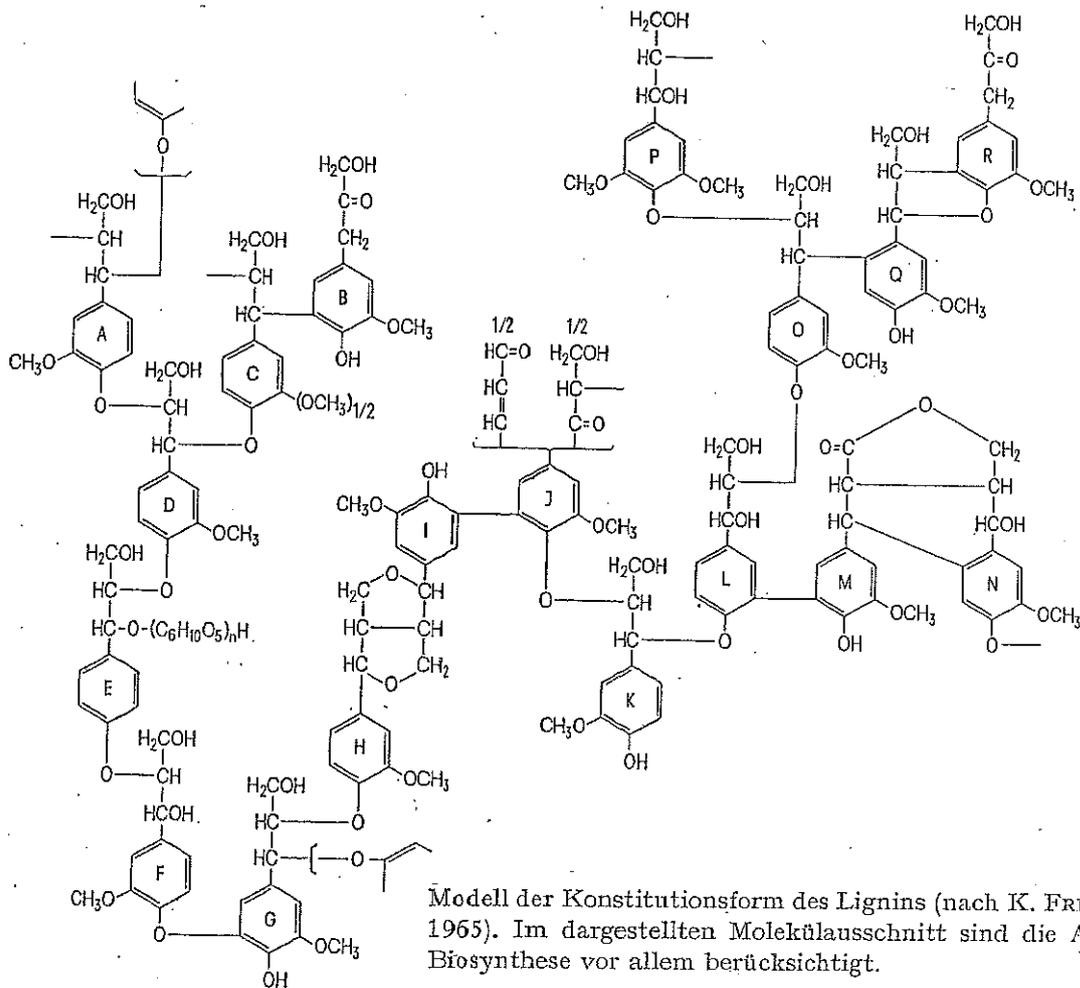
Lignin tritt nicht als selbständiger Baustein auf, sondern als Begleiter von Cellulose. Lignin (wie eingangs erwähnt, mit Anteilen von ca. 26% des Holzes) besteht aus

- 60 % Kohlenstoff
- 34 % Sauerstoff
- 6 % Wasserstoff

Ligninreiche Hölzer sind demzufolge kohlenstoffreicher als ligninarme. Lignin ist ein bräunlich-weißer, krümeliger, aromatischer, völlig amorpher Stoff. Lignin läßt sich durch Säuren nicht hydrolysieren und hat einen geringen Polymerisierungsgrad. Seine Bausteine sind nicht wie bei der Cellulose zu langen Ketten aneinandergereiht, sondern zu riesigen dreidimensionalen Molekülen vernetzt (Makromoleküle). Die Isolierung des Lignins aus der Zellwand ist nicht möglich, ohne daß das Lignin angegriffen und in

seiner ursprünglichen Beschaffenheit zerstört wird. Lignin füllt die Zwischenräume in den Fibrillen und zwischen ihnen quasi als Imprägnierungsmittel. Die einzelnen Ligninarten weisen wesentliche Unterschiede auf, je nachdem, ob es sich um Laubholz oder Nadelholz handelt.

Für Lignin des Fichtenholzes gilt z. B. die chemische Formel  $C_9 H_{8,1} O_{2,4} (OCH_3)_{0,9}$



Lignin ist ein wenig strukturierter Füllstoff, der das pflanzliche Gewebe erst zum Holz macht (Verholungsprozess / Lignifizierung), ähnlich dem Beton im Stahlbeton (Armierungseisen = Cellulose). Der Lignin- bzw. Cellulosegehalt hängt von den Wuchsgebieten ab. So wird die Ligninbildung z.B. durch Wärme gefördert (siehe Tropenhölzer). Die Druckfestigkeit steigt mit dem Ligningehalt.

## Weitere Bestandteile des Holzes

Diese werden auch akzessorische Bestandteile genannt. Diese Stoffe sind für verschiedene Baumarten charakteristisch bzw. werden wirtschaftlich genutzt. Es betrifft insbesondere die Speicherstoffe.

### Ätherische Öle und Harze

Sie kommen vor allem in Koniferen (Nadelhölzern) vor und befinden sich dort in interzellulären Hohlräumen. Sie sind ökonomisch von Bedeutung als

- Lösungsmittel
- Geruchstoffe
- Harz für Kolophonium und Terpentinöl (besonders bei Kiefern und deren Stockholz) weniger bei Lärche, Fichte und Douglasie

### Stärke und Fette

Sie sind wichtige Speicherstoffe des Holzes. Sie werden in den Parenchymzellen des Holzes eingelagert und ermöglichen bei Laubhölzern z. B. schon vor dem Laubausbruch die Hölzbildung. Der Gesamtanteil am Volumen beträgt nur etwa 2 %. Ein besonders hoher Stärkegehalt ist bei Bergahorn und Ulme zu verzeichnen.

### Gerbstoffe

Gerbstoffe verwandeln tierische Haut in Leder. Sie kommen in den Parenchymzellen der Markstrahlen vor und sind besonders bei Kastanie und Eiche zu finden. Bei Edelkastanie kommen sie im Splint- und im Kernholz vor. Bei Fichte sind die Gerbstoffe fast nur in der Rinde (Lohrinde) zu finden. Durch ihre Oxydationsprodukte wird die Farbe vieler Kernhölzer bestimmt.

### Übrige Bestandteile

- Phenolische Substanzen:

Diese Stoffe sind nur in geringen Mengen vertreten und haben als Kerninhaltsstoffe eine praktische Bedeutung, z. B. im Kernholz der Kiefer als Pinosylvin, welches stark toxisch gegen Bakterien, Pilze und Insekten wirkt (außer bei Kiefern-Baumschwamm). Außerdem ist dieser Stoff dafür verantwortlich, daß sich Kiefernholz nicht in saurer Sulfitkochung zu Zellstoff aufschließen läßt. Zu dieser Gruppe zählen auch verschiedene Farbstoffe tropischer Baumarten, z.B. das Hämatoxylin im Blauholz.

- Tropolone kommen in Cypressengewächsen z. B. als

\*Thujaplicin bei Thuja plicata

\*Nootkatin bei Chamaecyparis nootkatensis (nach einem Indianerstamm benannt, Holz

ist leicht, dauerhaft, widerstandsfähig gegen Pilze und Insekten gut zu bearbeiten  
 \*Taxin bei *Taxus baccata*

### Mineralstoffe und Aschegehalt

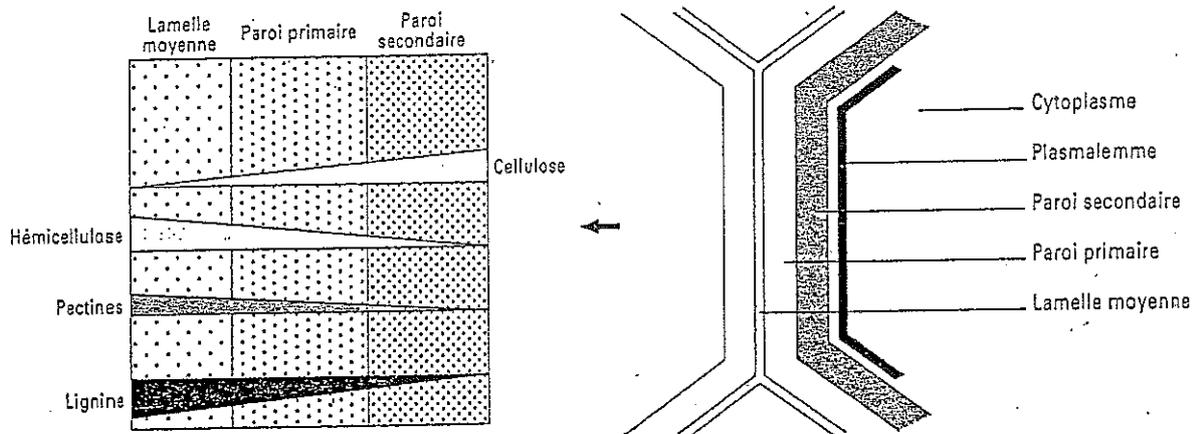
Die anorganischen Verbindungen können nach einer Verbrennung des Holzes in seiner Asche nachgewiesen werden. Der Aschegehalt beträgt 0,3 bis 1 % der Holztrocken- substanz. Dabei ist der Aschegehalt der Laubhölzer höher als jener der Nadelhölzer. Junges Holz und Rinde haben einen höheren Aschegehalt. Vor der Zeit des Kalibergbaues wurden Kalisalze auf dem Wege des Pottaschebrennens gewonnen. Kalisalze waren nötig für die Glasherstellung.

### Chemische Zusammensetzung von Normalholz und Richtgewebe

Die Angaben zeigen, daß sich im Druckholz der Koniferen wesentlich weniger Cellulose befindet als im Normalholz, dafür aber wesentlich mehr Lignin nachgewiesen werden kann. Im Zugholz der Laubhölzer sind die Verhältnisse genau umgekehrt. Hier befindet sich wesentlich mehr Cellulose, dafür etwas weniger Lignin im Zugholz.

### pH-Werte

Holz im lebenden Stamm ist schwach sauer bei pH-Werten von 4,1 bis 6,2.



Zahlentafel 15 (Sergejeva, 1959)

Elementarzusammensetzung verschiedener Baumteile in Prozent

Holzart	Stamm				Zweige			
	C	H	O	N	C	H	O	N
Eiche . . .	50,64	6,23	41,85	1,28	50,89	6,16	41,94	1,01
Buche . .	50,89	5,07	42,11	0,93	50,08	6,23	42,61	1,08
Birke . .	50,61	6,23	42,04	1,12	51,93	6,31	40,69	1,07
Weide . .	51,75	6,19	41,08	0,98	54,03	6,56	37,93	1,48
Espe . . .	50,31	6,32	42,39	0,98	51,02	6,28	41,65	1,05
Fichte . .	51,39	6,11	41,56	0,94	—	—	—	—

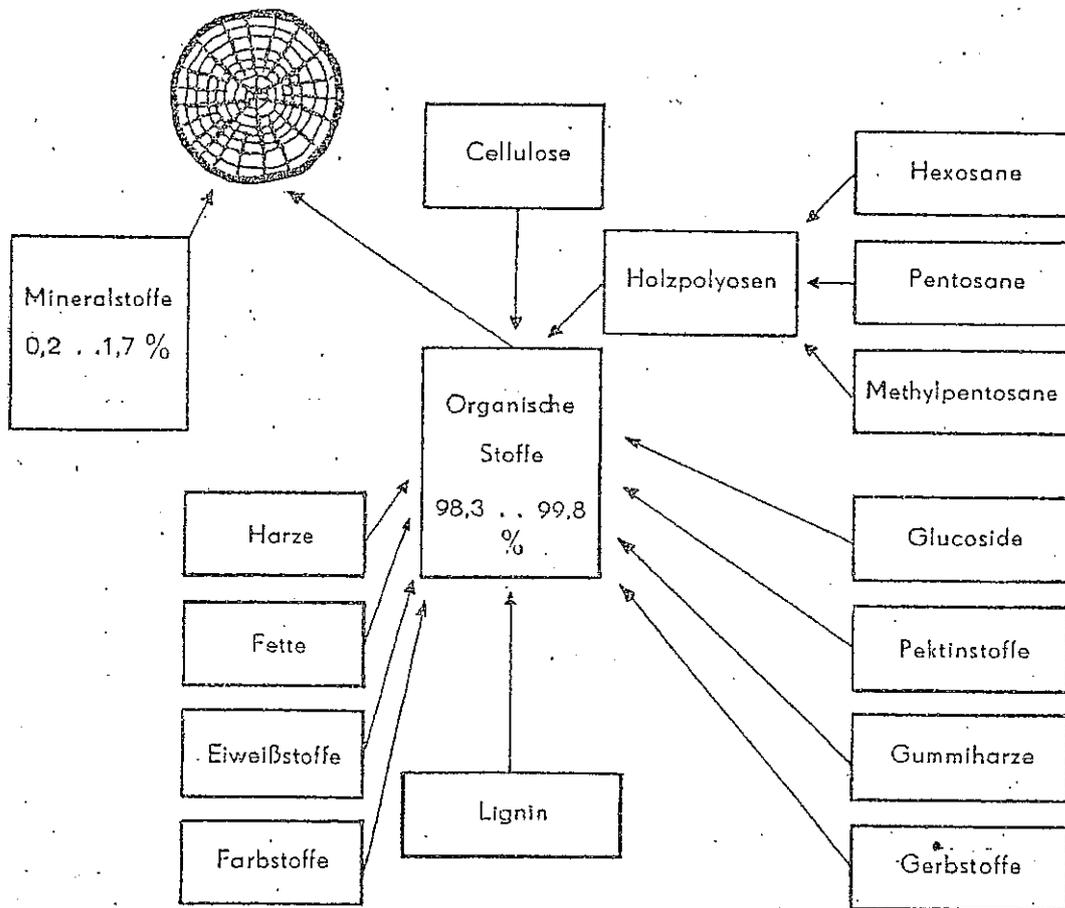
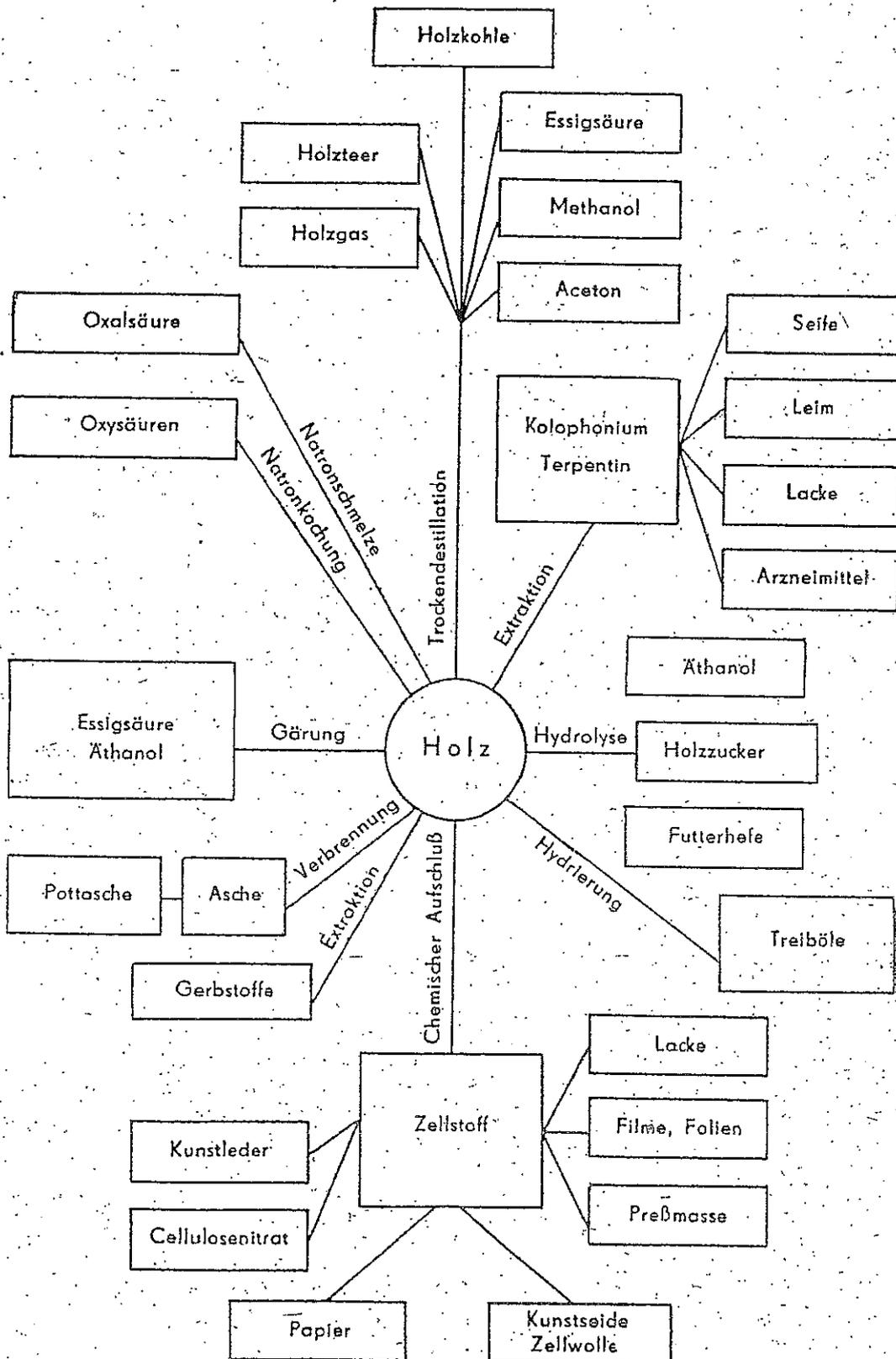


Bild. 19. Chemische Zusammensetzung des Holzes

# Übersicht der chemischen Verarbeitung des Holzes

(Aus: A.S.Sergejewa, 1959)



# Kapitel - Physik des Holzes

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz, ETH Zürich,  
Institut für Baustoffe, *Holzphysik*

Mail: niemzp@ethz.ch  
<http://www.ifb.ethz.ch>

- 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

Fragenkomplexe

# 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:

## *Fachbücher*

Autorenkollektiv (1990): Lexikon der Holztechnik. 4. Aufl. Leipzig, Fachbuchverlag

Autorenkollektiv (2003): Holzlexikon. 4. Auflage, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen

Bodig, J.; Jayne, B.A. (1993): Mechanics of wood and wood composites. Krieger, Florida, 712 S.

Dunky, M.; Niemz, P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime. Springer Verlag, Berlin, 954 S.

Halász, R. v.; Scheer, C. (Hrsg.) (1986): Holzbau-Taschenbuch. 8. Auflage, Band 1, Architektur techn. Wissenschaften, Berlin

Kollmann, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe (Bd. 1). 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin 1050 S.

Kollmann, F.; Coté, W. (1968): Principles of Wood Science and Technology. (Bd.1), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 592 S.

Kollmann, F.; Kuenzi, E.; Stamm, A. (1975): Principles of Wood Science and Technology. (Bd.2), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 703 S.

Niemz, P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 243 S.

Trendelenburg R.; Mayer- Wegelin H. (1955): Das Holz als Rohstoff. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, München, 541 S.

Willeitner, H.; Schwab, E. (1981): Holz - Aussenverwendung im Hochbau. Verlagsanstalt Alexander Koch, Stuttgart

Wagenführ, A.; Scholz, F. Taschenbuch der Holztechnik, Fachbuchverlag, Leipzig, 2008 (Kapitel Holzphysik, Holzwerkstoffe P. Niemz)

## *Weitere Literatur*

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

Alle in der ETH Bibliothek ( meist auch elektronisch) verfügbar

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.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete/fg_wald/rubrik2/holzinfos)  
[http://www.statistik.admin.ch/stat\\_ch](http://www.statistik.admin.ch/stat_ch)

***Weiterführende Lehrveranstaltungen***

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

# 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.

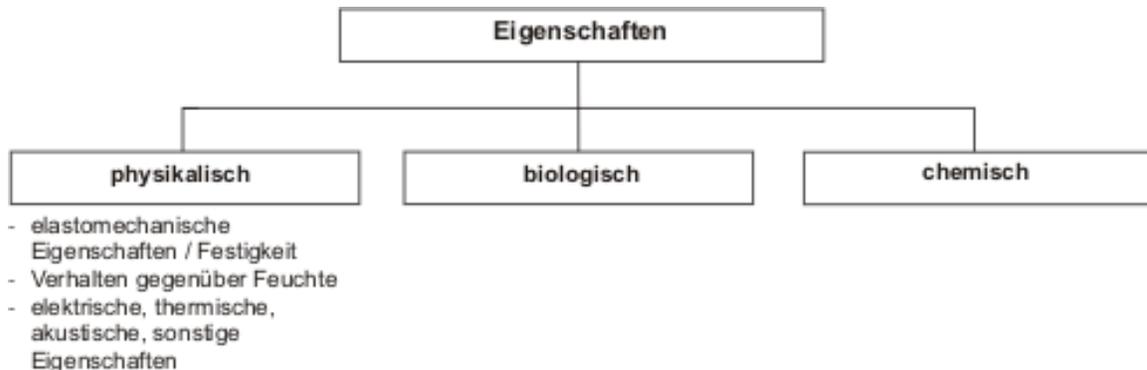


Abb. 1. Einteilung der Eigenschaften von Holz

### **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, Schnittrichtung, Jahrringbreite, 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 Jahrringe sind weitleumiger 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 Schnittrichtung 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 tiefere 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:

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

u	Feuchtegehalt
m <sub>u</sub>	Masse des Holzes im feuchten Zustand
m <sub>dtr</sub>	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.

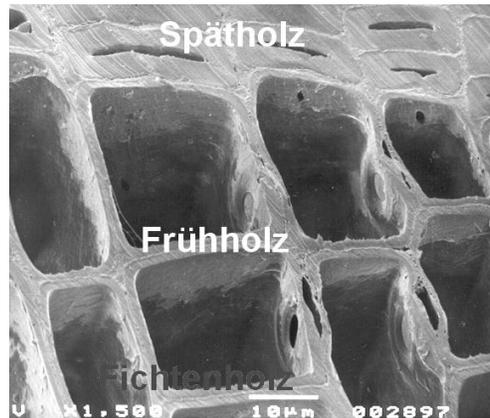
### Sorptionsverhalten

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))).

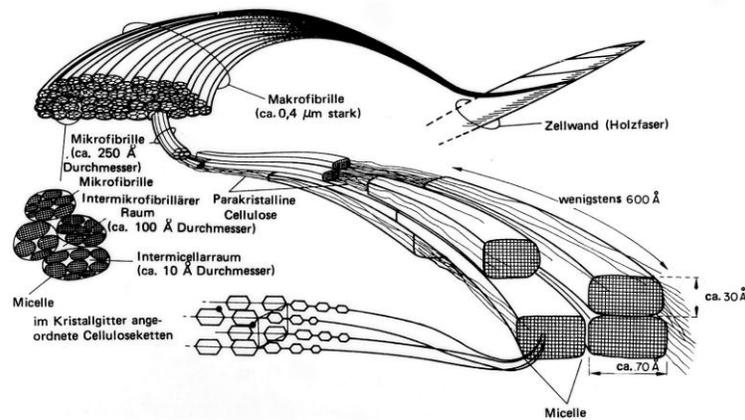
Die Feuchteaufnahme und -bindung wird dabei getrennt in

- 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  $r=1,06 \cdot 10^{-4}\text{cm}$  = rel. Dampfdruck 99,9%;  $r = 0,86 \cdot 10^{-7}\text{cm}$  = 30% rel. Dampfdruck, Burmester (1970)).

Abbild. 3a zeigt die 3 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.

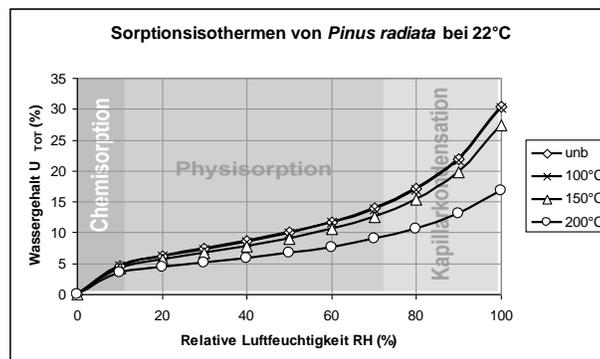
Der Feuchtetransport im Holz erfolgt nach den Gesetzen der Kapillarphysik (von weiten in Richtung enger Kapillaren), unterhalb der Fasersättigung durch Diffusion.

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-Sorptionstheorie** (BET-Methode) beschrieben werden (siehe Popper, Niemz, Eberle 2001).

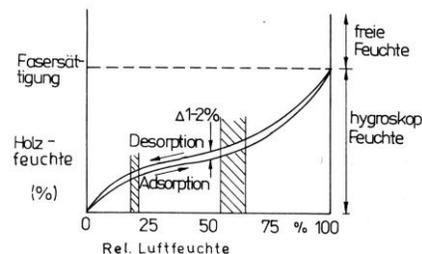
Durch thermische oder hydrothermische Vorbehandlung (z.B. auch Hochtemperatur-trocknung) kann die Gleichgewichtsfeuchte des Holzes reduziert werden (siehe z.B. Burmester 1975). Abb. 3.a) zeigt dies. Eine wesentliche Reduzierung der Holzfeuchte tritt etwa ab 200°C auf. Nach Burmester (1975) führt eine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

Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  eines Stoffes (DIN EN ISO 12572, auch als Diffusionswiderstandsfaktor benannt) ist der Quotient aus dem Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten der Luft  $\delta_D$  und dem des betreffenden Stoffes und gibt an, wieviel mal grösser der Diffusionsdurchlasswiderstand des Stoffes ist als der einer gleich dicken, ruhenden Luftschicht gleicher Temperatur.

Die Wasserdampf-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.

Kenngrösse 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  $670 \text{ kg/m}^3$ ):  
 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 Schnittrichtung 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 Hauptschnittrichtungen 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  $150^\circ\text{C}$  bis  $200^\circ\text{C}$ ) 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 (%/%).

Tabelle1: 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  $30\text{N/mm}^2$  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 Feuchteaufnahme des Holzes deutlich verzögert werden.

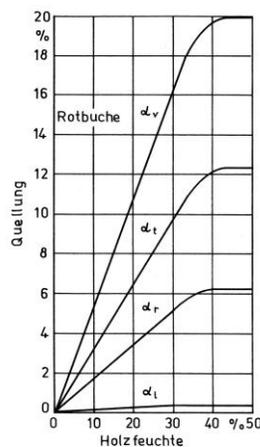


Abb.4: Quellverhalten von Rotbuche in Abhängigkeit von der Holzfeuchte und den Schnittrichtungen

### **Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtegehaltes**

Als Basismethode dient die Darmmethode. Dabei wird die Probe im feuchten und im darrtrockenen Zustand gewogen. Zur Bestimmung der Darmmasse 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)

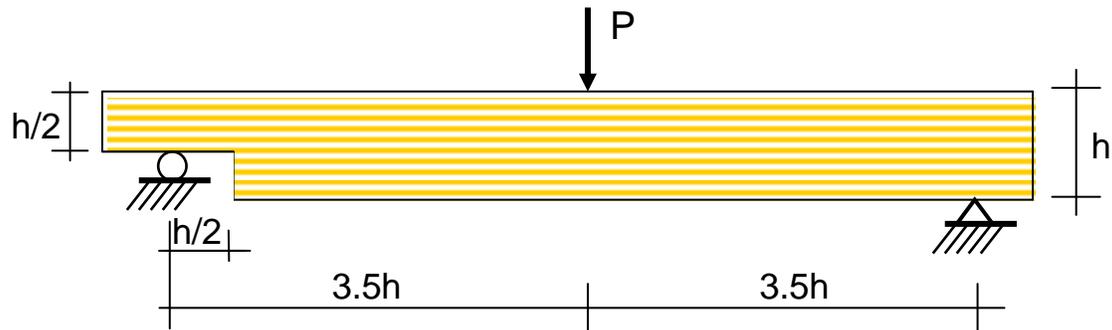
- die elektrische Widerstandsmessung (on- und offline)
- Mikrowellenverfahren
- die dielektrische Feuchtemessung
- optische Verfahren auf Basis der NIR- Spektroskopie
- die Neutronenradiographie; mit dieser Methode können lokale Feuchteverteilungen auch quantitativ nachgewiesen werden (Lehmann, Vontobel,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



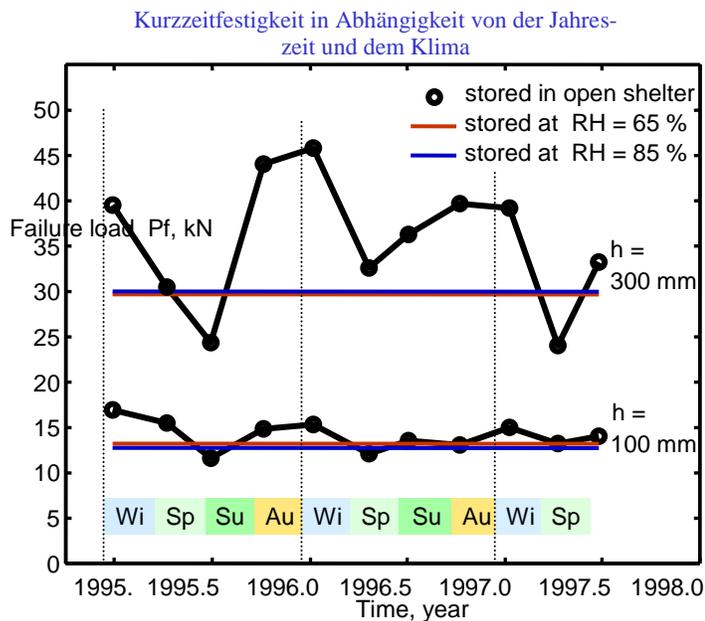
Geometrie:

Höhe: = 100 mm oder 300 mm

Breite: = 90 mm

Material:

Brettschichtholz aus Fichte, C35, Dichte  $475 \text{ kg/m}^3$ , 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, Quellung und die Wärmeleitfähigkeit. Die Dichte variiert zwischen den einzelnen Holzarten in einem weiten Bereich von  $100\text{kg/m}^3$  (Balsa) bis  $1200\text{kg/m}^3$  (Pockholz). Die Rohdichte berechnet sich zu:

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

$\rho$	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.  $1500\text{kg/m}^3$ .

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)).

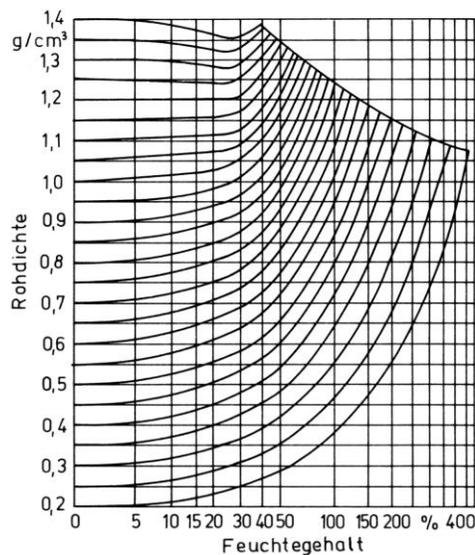


Abb.6: Einfluss der Holzfeuchte auf die Rohdichte (DIN 52182)

## 4. Thermische Eigenschaften

### *Wärmeleitfähigkeit/Wärmekapazität*

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (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 Feu-

erwiderstand. 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. Brettschicht-holz) 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)

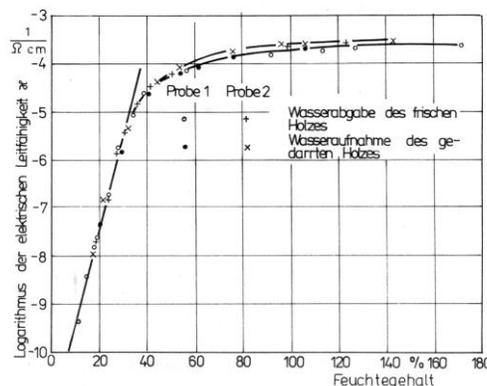
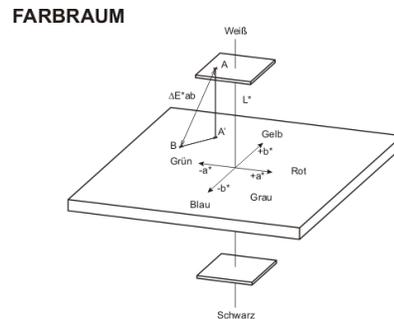


Abb. 7: Einfluss der Holzfeuchte und der Temperatur auf den elektrischen Widerstand von Redwood (nach Stamm, 1930, zitiert in Kollmann 1951)

## 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 häu-

fig 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.



farbraum.cdr

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:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (Gl. 3)$$

E- E-Modul,

Für *Transversalwellen* gilt:

$$c_{Trans} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} * \frac{1}{2(1 + \mu)} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (Gl. 4)$$

Dabei bedeuten:

G- Schubmodul,  $\rho$ - Rohdichte, E- Elastizitätsmodul,  $\mu$ - 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 verbautem 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 Faserlastwinkel (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 <sup>3</sup> )	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 Holzinhaltsstoffen) 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 Dachbinde in Düngemittellagern verwendet. Beim Kontakt mit Metall kommt es je nach Holzart teilweise durch vorhandene Inhaltsstoffe 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,  $\sigma$ - 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.

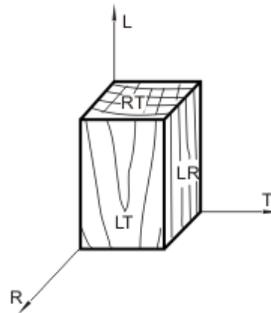


Abb. 9: Hauptachsen des Holzes und deren Zuordnung  
L- Longitudinal (1), R- Radial (2), T- Tangential (3)

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

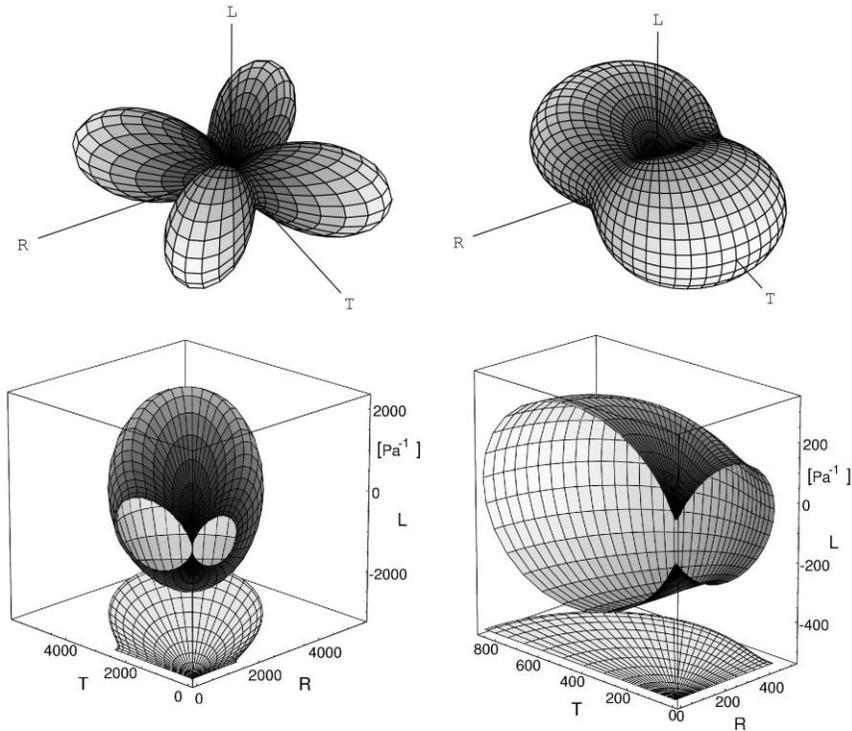
Nachfolgend werden die allgemeinen Grundlagen der Bestimmung der elastischen und der Festigkeitseigenschaften gegeben. In den Anlagen ist eine Übersicht zu den wesentlichen geltenden Normen enthalten.

## 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 Hookeschen 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 Verzerrungs-





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  $45^\circ$  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:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Gl. 5})$$

$\varepsilon$  - Dehnung  
 $\Delta l$  - Längenänderung  
 $l$  - Anfangslänge

Innerhalb des elastischen Bereiches gilt (Hookesches Gesetz):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (\text{Gl. 6-1})$$

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (\text{Gl. 6-2})$$

$\sigma$  - Spannung (N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  - Dehnung (%)

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

E - Elastizitätsmodul (N/mm<sup>2</sup>)

G - Schubmodul (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau$  - Schubspannungen in N/mm<sup>2</sup>

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]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 7-1})$$

oder allgemein  $\varepsilon = S \cdot \sigma$  (Gl. 7-2)

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

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \quad (\text{Gl. 7-3})$$

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

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  - Dehnungen (Körper ändert Abmessungen, d.h. Volumen aber nicht die Gestalt)  $\gamma_{23} \gamma_{13} \gamma_{12}$  - Gleitungen (Körper ändert Gestalt, aber nicht Volumen);

$\sigma$  - Normalspannungen,  $\tau$  - 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:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1}, & S_{22} &= \frac{1}{E_2}, & S_{33} &= \frac{1}{E_3} \\ S_{44} &= \frac{1}{G_{23}}, & S_{55} &= \frac{1}{G_{13}}, & S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \\ S_{12} &= \frac{-\mu_{21}}{E_2}, & S_{13} &= \frac{-\mu_{31}}{E_3}, & S_{23} &= \frac{-\mu_{32}}{E_3}, \\ S_{21} &= \frac{-\mu_{12}}{E_1}, & S_{31} &= \frac{-\mu_{13}}{E_1}, & S_{32} &= \frac{-\mu_{23}}{E_2} \end{aligned}$$

$\mu$ - 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.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (Gl. 7-4)$$

$\varepsilon$  - Normalspannungen

$\tau$  - Schubspannungen

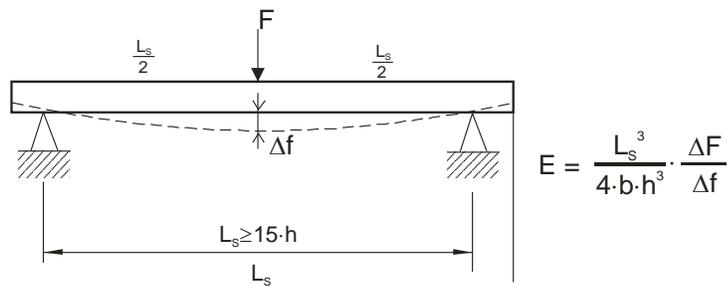
Kenngrößen und deren Bestimmung

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

#### *E-Modul*

Der Elastizitätsmodul wird bei Normalspannungen (Zug, Druck) aus der Gleichung 6-1 (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

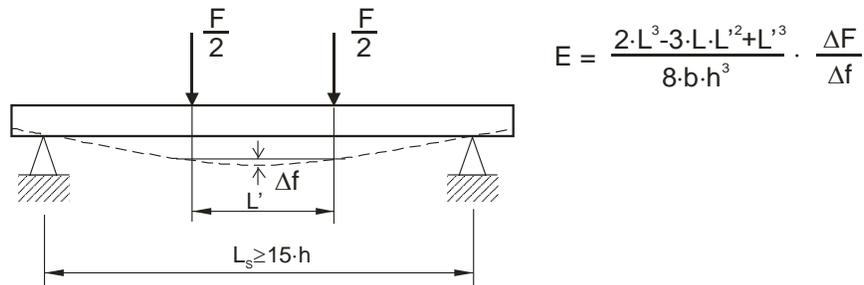


Abb. 11: Bestimmung des E-Moduls bei Biegebelastung

### *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-Spät Holz). Sehr typisch ist ein Versagen durch Rollschub bei Sperrholz und bei Brettschichtholz in den in RT-Richtung beanspruchten Mittellagen.

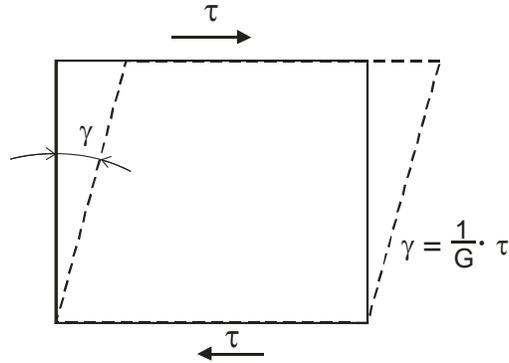


Abb. 12: Bestimmung des Schubmoduls

### 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:

$$\frac{\Delta b}{b} = -\mu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (Gl. 8)$$

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

also z.B.

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

$\mu$ - Poissonsche Konstante (-)

$\varepsilon$ - Dehnung (%)

$l$ - Länge der Probe,  $\Delta l$ - Längenänderung

$b$ -Breite der Probe,  $\Delta b$  – 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:

<b>Elastizitäts-Modul (E):</b>	$E_T$	:	$E_R$	:	$E_L$
• bei Nadelholz:	1	:	1,7	:	20
• bei Laubholz:	1	:	1,7	:	13

### Schub- Moduln (G):

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

- bei Nadelholz: 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).

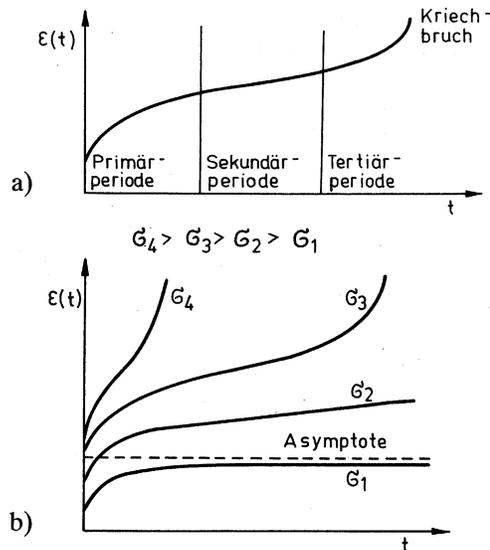


Abb. 13: Phasen der Kriechverformung

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

$$\varphi = \frac{f_t - f_0}{f_0} \quad (\text{Gl. 9})$$

$\varphi$ - 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 N/mm<sup>2</sup> 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%.

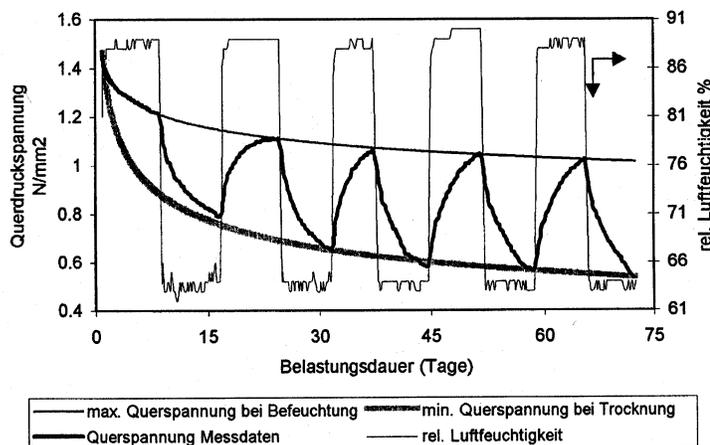


Abb. 14: Spannungs- und Feuchteverlauf in vorgespanntem Brettschichtholz (Spannungsrelaxation) nach Popper, Gehri und Eberle (1999)

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 Fließen 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 Kräfteinwirkung oder wechselnde Belastung).

Nach der Kräfteinleitung 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:

$$L^q_{5\%} = x - s \cdot t \quad (\text{Gl. 10-1})$$

- oberes 5%-Quantil:

$$U^q_{5\%} = x + s \cdot t \quad (\text{Gl. 10-2})$$

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. 11 zu:

$$\sigma_{zB} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (\text{Gl. 11})$$

$F_{\max}$ - Bruchkraft

A- Querschnittsfläche der Probe (Länge · Breite)

$\sigma_{zB}$ - Zugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

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. Querzugbeanspruchung ist daher im Holzbau möglichst 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 ( $\sigma_{dB}$ ) berechnet sich analog Gl. 11. 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. 12 zu:

$$\sigma_{bB} = \frac{M_b}{W_b} \quad (\text{Gl. 12-1})$$

für einen rechteckigen Querschnitt und eine Dreipunktbiegung gilt:

$$\sigma_{bB} = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l_s}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (\text{Gl. 12-2})$$

$M_b$  -Biegemoment  
 $W_b$  -Widerstandsmoment  
 $\sigma_{bB}$  - Biegefestigkeit in  $\text{N/mm}^2$   
 $F_{\max}$  -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 Kräfteinleitung 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).

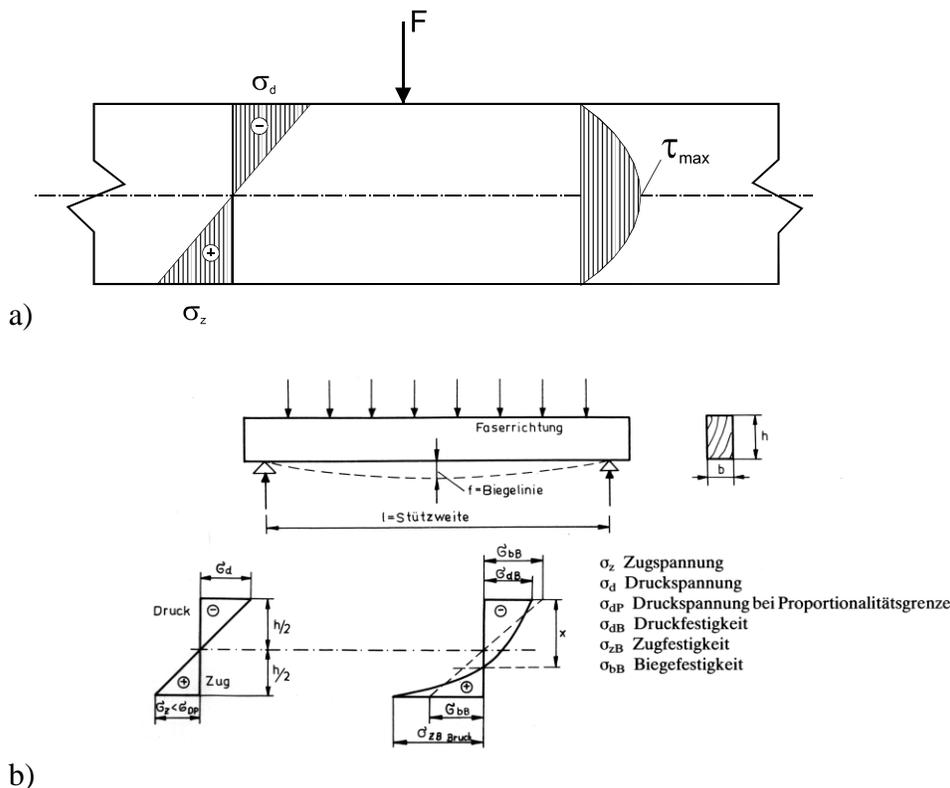


Abb. 15: Spannungsverteilung bei Biegebelastung

- 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 Krafteintrag auf. Daher kann bei Vierpunktbelastung unter Zugrundelegung der Durchbiegung im schubspannungsfreien Bereich ein E-Modul bei reiner Biegung ermittelt werden.

Bei Dreipunktbelastung ist das Ergebnis dagegen durch die auftretenden Querkräfte immer vom Schubeinfluss überlagert. Der Biege-E-Modul ist also in diesem Falle vom Verhältnis Stützweite zu Dicke abhängig. Mit zunehmender Belastung verschiebt sich infolge der Unterschiede zwischen Zug- und Druckfestigkeit bei Vollholz die Spannungsnulllinie in Richtung Zugzone (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  $\text{kJ/m}^3$  (bezogen auf das Probenvolumen zwischen den Auflagern) angegeben.

$$W_u = \frac{W_{F_{\max}}}{V} \quad (\text{Gl. 13})$$

Die Brucharbeit sagt etwas zur Zähigkeit des Materials aus.

$W_u$ - Arbeit bis zur Maximalkraft beim Bruch in  $\text{kJ/m}^3$  (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 entgegengesetzt. Bei Scherbelastung wirken zwei gegenläufig angreifende Kräftepaare. Die Scherfestigkeit berechnet sich nach Gl. 14 zu:

$$\sigma_{\text{scher}} = \frac{F_{\max}}{a \cdot b} \quad (\text{Gl. 14})$$

$\sigma_{\text{scher}}$ -Scherfestigkeit in  $\text{N/mm}^2$

$F_{\max}$ - 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. Nagel auszieh 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

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (Gl. 15)$$

- unter Verwendung der Eindrucktiefe

$$HB = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h} \quad (Gl. 16)$$

HB- Härte nach Brinell (N/mm<sup>2</sup>)

F- Kraft (N)

D- Kugeldurchmesser (mm)

d- Kalottendurchmesser (mm)  
h- Eindringtiefe (mm)

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

Holzart	Rohdichte in $\text{g/cm}^3$ bei $u = 12\%$	Brinellhärte auf Hirnfläche in $\text{N/mm}^2$	Brinellhärte auf Sei- tenfläche in $\text{N/mm}^2$
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 Pendel-schlagwerk (Labormaßstab) erzeugten schlagartigen Belastung. Gemessen wird die Bruchschlagarbeit in  $\text{kJ/m}^2$ . Insbesondere Pilzbefall wirkt sich stark negativ auf die Bruchschlagarbeit aus.

### Wechselfestigkeit

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

### Reibungsbeiwerte

Unter dem Reibungsbeiwert  $\mu$  versteht man das Verhältnis von Reibkraft  $F_R$  zu Normal-kraft  $F_N$ . Wir unterscheiden zwischen Haft- und Gleitreibung. Die Gleitreibung ist gerin-ger 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: Quer-schubriss).

Gegenstand der Bruchmechanik ist die Entwicklung analytischer Modelle des Bruchvor-ganges sowie von Kenngrößen und Prüfmethode zur bruchsicHERen Gestaltung von Werkstoffen und Bauteilen. Unter der Bruchzähigkeit versteht man den kritischen Span-nungsintensitätsfaktor  $K_{IC}$ , bei dem Gewaltbruch eintritt. Der Wert von  $K_{IC}$  gibt Auf-

$$K = \frac{P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot Y$$

schluss darüber, welchen Widerstand ein Material der Ausbreitung eines Risses entgensetzt. Neben der Bruchzähigkeit wird häufig die Bruchenergie geprüft.

$$K = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (\text{Gl. 17})$$

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

$\sigma$ - 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 \* $\sqrt{\text{m}}$ .

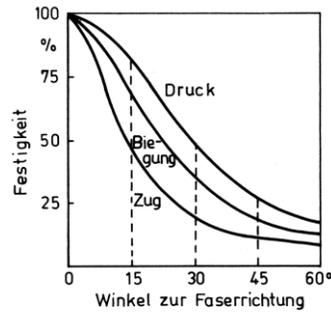
Häufig wird auch die in vielen Fällen aussagefähigere Bruchenergie verwendet.

## 9.4.7 Wichtige Einflussfaktoren auf die Festigkeitseigenschaften

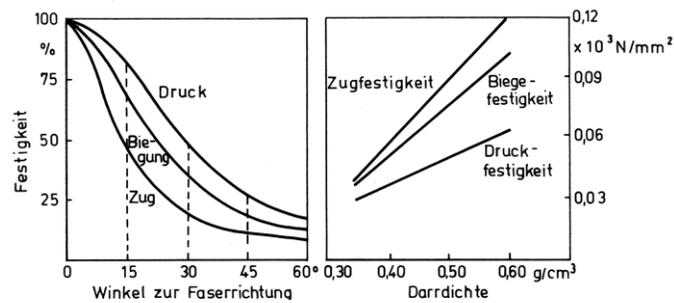
Die Festigkeit in Faserrichtung ist deutlich höher als senkrecht zur Faserrichtung. Sie ist radial höher als tangential. Mit zunehmendem Winkel zwischen Probenlängsachse und Faserrichtung (Faser-Last-Winkel) sinken die elastischen Konstanten und die Festigkeit deutlich ab. Der Einfluss des Faser-Last-Winkels 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.

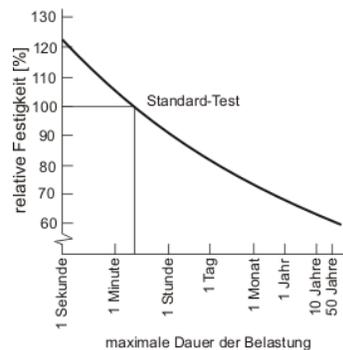
In Abhängigkeit von der Lasteinwirkung wird zwischen statischer und dynamischer Beanspruchung unterschieden. Der Zeiteinfluss ist auch bei allen klassischen mechanischen Prüfungen im Kurzzeitversuch vorhanden. Daher ist die maximale Zeitdauer bis zum Bruch genormt (z. B. nach EN 310 bei der Biegeprüfung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



a)



b)



c)

Abb. 16: Wichtige Einflussgrößen auf die Festigkeit des Holzes

- Faser-Last-Winkel
- Rohdichte
- Belastungsart (dynamisch, statisch)
- 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 Festigkeitseigenschaften 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:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^m \cong \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^{ml} \cdot \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{mb} \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{md} \quad (Gl. 18)$$

Für die 10 %- Fraktile gilt beispielsweise:

V- Volumen des Prüfkörpers

$\sigma$ - 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:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1/k} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^m \quad (Gl. 19)$$

$\sigma$  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/mm<sup>2</sup>) 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.; Coté, W. (1968): Principles of Wood Science and Technology. (Bd.1), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 592 S.
- Kollmann, F.; Kuenzi, E.; Stamm, A. (1975): Principles of Wood Science and Technology. (Bd.2), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 703 S.
- Niemz, P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 243 S.
- 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 Faserrichtung. 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 Bruchfähigkeit 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, Bratislava, 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): Coatings 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 Parketherstellung. 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 Forskningscentral 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	2008-12	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadel-schnittholz
DIN 4074-2	1958-12	Bauholz für Holzbauteile; Gütebedingungen für Baurund-holz (Nadelholz)
DIN 4074-3	2008-12	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 3: Appa- rate zur Unterstützung der visuellen Sortierung von Schnitt- holz; Anforderungen und Prüfung
DIN 4074-4	2008-12	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 4: Nach- weis der Eignung zur apparativ unterstützten Schnittholz- sortierung
DIN 4074-5	2008-12	Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laub- schnittholz

### **Prüfung**

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 Schwin- dung
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 Fa- serrichtung
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 EN 1533	2010-12	Holzfußböden - Bestimmung der Biegefestigkeit unter statischer Beanspruchung - Prüfmethode; Deutsche Fassung EN 1533:2010
DIN EN 1534	2011-01	Holzfußböden - Bestimmung des Eindruckwiderstands - Prüfmethode; Deutsche Fassung EN 1534:2010
DIN EN 1910	2000-03	Parkett und anderer Holzfußböden und Wand- und Deckenbekleidungen 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 1309-2	2006-06	Rund- und Schnittholz – Verfahren zur Messung der Maße – Teil 2: Rundholz – Anforderungen an die Messung und Regeln zur Volumenberechnung; Deutsche Fassung EN 1309-2:2006
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 Schädlingsbefall; 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 Fassung EN 13183-2:2002
DIN EN 13183-2	Berichtigung 1	2003-12 Berichtigungen zu DIN EN 13183-2:2002-07
DIN EN 13183-3	2005-06	Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 3: Schätzung durch kapazitives Messverfahren; Deutsche Fassung EN 13183-3:2005

### **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

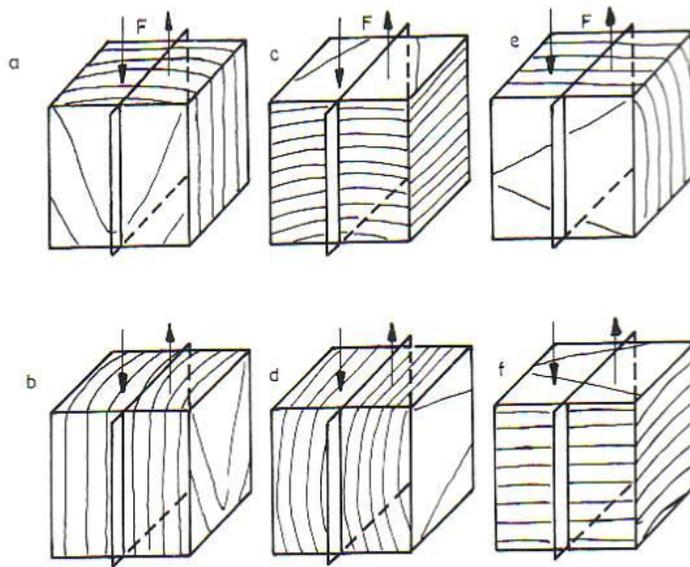
Tabelle 1: Eigenschaften (Mittelwerte) ausgewählter Holzarten nach Sell (1997)

Holzart	Rohdichte $\rho_{15}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Darrdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Druckfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	Zugfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	Biegefestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	E-Modul (N/mm <sup>2</sup> ) parallel	Scherfestigkeit parallel (N/mm <sup>2</sup> )	Bruchschlagarbeit (Nm/cm <sup>2</sup> )	Härte nach Brinell (N/mm <sup>2</sup> )H <sub>B</sub> parallel	Härte nach Brinell (N/mm <sup>2</sup> )H <sub>B</sub> 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	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			
<b>Fichte</b>		a	b	c	d
Rohdichte	x	0,43	0,44	0,44	0,44
[g/cm <sup>3</sup> ]	s	0,03	0,03	0,02	0,03
Scherfestigkeit	x	9,89	8,73	2,83	2,49
[N/mm <sup>2</sup> ]	s	1,10	0,50	0,64	0,65
<b>Buche</b>					
Rohdichte	x	0,68	0,69	0,69	0,71
[g/cm <sup>3</sup> ]	s	0,03	0,03	0,04	0,04
Scherfestigkeit	x	14,31	18,34	6,88	9,36
[N/mm <sup>2</sup> ]	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		Holz- feuchte in %	$E_L$ $E_R$ $E_T$	$E_L/E_R$ $E_L/E_T$ $E_R/E_T$	$G_{LT}$ $G_{LR}$ $G_{RT}$	$G_{LR}/G_{LT}$ $G_{LR}/G_{RT}$ $G_{LT}/G_{RT}$	$\mu_{RL}$ $\mu_{TL}$ $\mu_{TR}$	$\mu_{LR}$ $\mu_{LT}$ $\mu_{RT}$
N°		(%)	(N/mm <sup>2</sup> )	(-)	(N/mm <sup>2</sup> )	(-)	(-)	(-)
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 <sup>1)</sup>	13.7	11287 980 429	11.5 26.3 2.3			0.049 0.028 0.26	0.447 0.561 0.586
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 <sup>2)</sup> 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
<sup>1)</sup> zitiert in [Neuhaus 1981]								
<sup>2)</sup> zitiert in [Kollmann 1975]								

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

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

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

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

## **Fragenkomplexe (in loser Folge; teils mit und teils ohne Lösung)**

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

**Antwort:**

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

Hemizellulosen (15 – 35 %): Gerüststoffe, Reservestoffe

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

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

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

**Antwort:**

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

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

Darrdichte: Rohdichte des vollständig getrockneten Holzes.

Raumdichtezahl: Darrmasse pro Volumen des Holzes im fasergesättigten Zustand.

- 7) **Erläutern Sie viskoelastische Eigenschaften von Holz**

**Antwort:**

Kriechen, Spannungsrelaxation, Dauerstandfestigkeit

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

**Antwort:**

Skizze; Zugfestigkeit ca. doppelt so gross wie Druckfestigkeit.

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

**Antwort:**

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

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

**Antwort:**

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

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

**Antwort:**

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

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

- 12) **Berechnen sie unter Verwendung der differentiellen Quellmasse die Quellung eines Brettes (1mx1m) bei freier Quellung**

- a) **wenn Bretter mit stehenden Jahrringen verklebt wurden (Quellung radial)**

- bis zum Fasersättigungsbereich
- wie gross ist die Quellung darüber

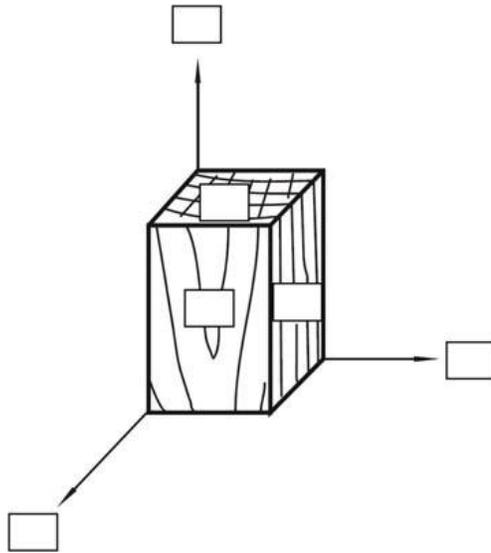
- b) **wenn Bretter mit liegenden Jahrringen verklebt wurden (Quellung radial)**

- bis zum Fasersättigungsbereich
- wie gross ist die Quellung darüber

- c) **wie gross ist die Längenquellung**

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

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



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

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

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

**Antwort:**

$$L_{\text{neu}} = (100\% + 0.009\%/ \% * 8\%) * 3000 \text{ mm} = 1.00072 * 3000 \text{ mm} = \underline{3002.16 \text{ mm}}$$

$$R_{\text{neu}} = (100\% + 0.11\%/ \% * 8\%) * 150 \text{ mm} = 1.0088 * 150 \text{ mm} = \underline{151.32 \text{ mm}}$$

$$T_{\text{neu}} = (100\% + 0.25\%/ \% * 8\%) * 22 \text{ mm} = 1.02 * 22 \text{ mm} = \underline{22.44 \text{ mm}}$$

$$L_{\text{neu}} = (100\% + 0.009\%/ \% * 18\%) * 3000 \text{ mm} = 1.00162 * 3000 \text{ mm} = \underline{3004.86 \text{ mm}}$$

$$R_{\text{neu}} = (100\% + 0.11\%/ \% * 18\%) * 150 \text{ mm} = 1.0198 * 150 \text{ mm} = \underline{152.97 \text{ mm}}$$

$$T_{\text{neu}} = (100\% + 0.25\%/ \% * 18\%) * 22 \text{ mm} = 1.045 * 22 \text{ mm} = \underline{22.99 \text{ mm}}$$

Keine Dimensionsänderungen oberhalb des Fasersättigungspunktes:

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

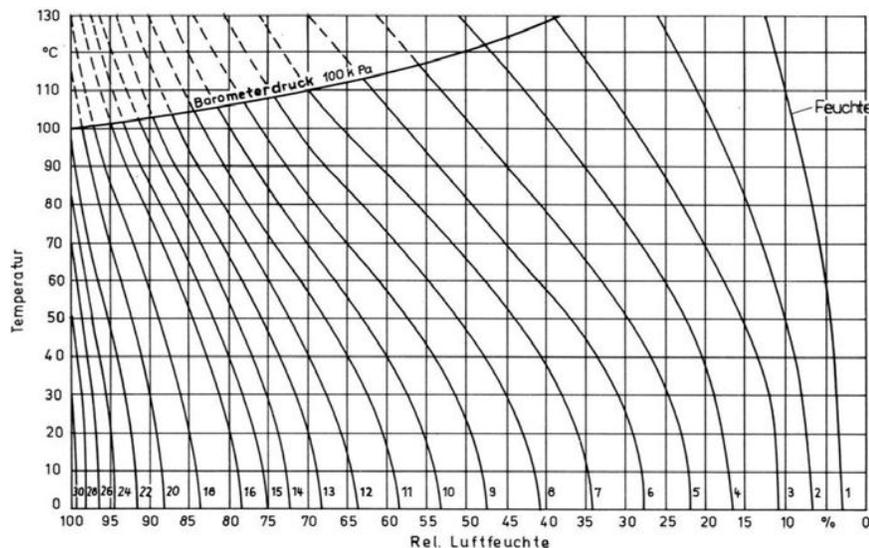
- 16) Berechnen Sie die Längen-, Breiten- und Dickenänderung einer Spanplatte, Platte im Format von 1m (Länge) x 1m (Breite) x 1,8cm (Dicke), bei einer Feuchteänderung von 8% auf 12%.

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

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

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

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



**Antwort:**

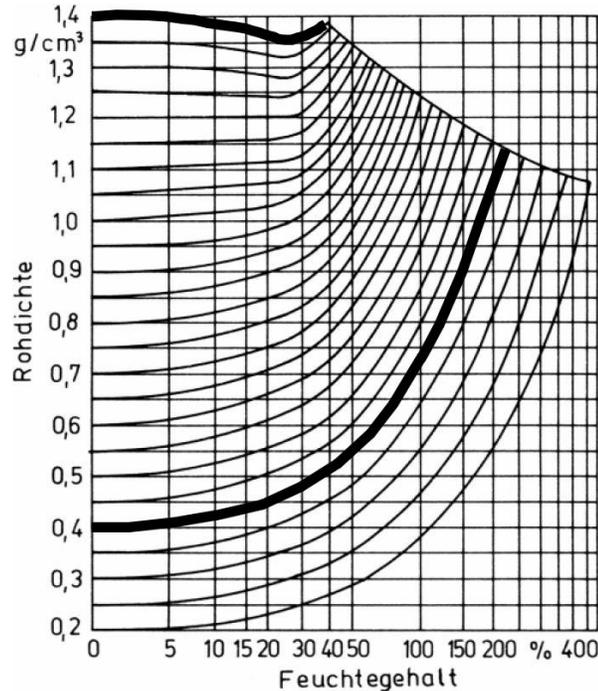
Neue Ausgleichsholzfeuchte

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

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

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

Antwort:

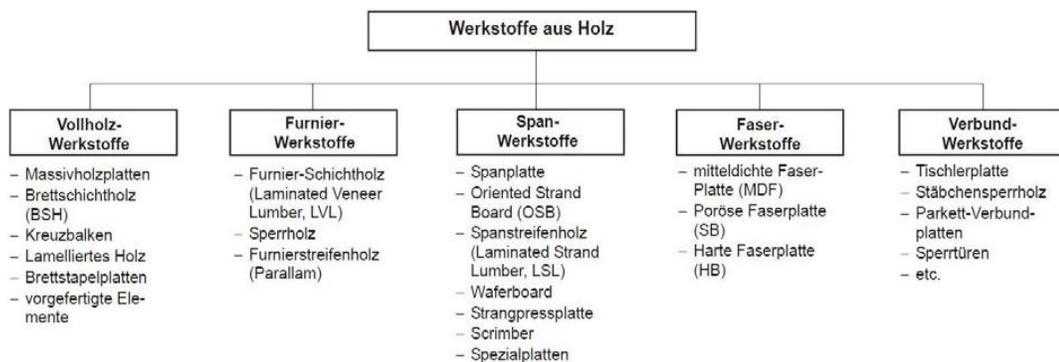


Die Holzart mit der geringeren Darrdichte kann einen höheren Holzfeuchtegehalt erreichen.

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

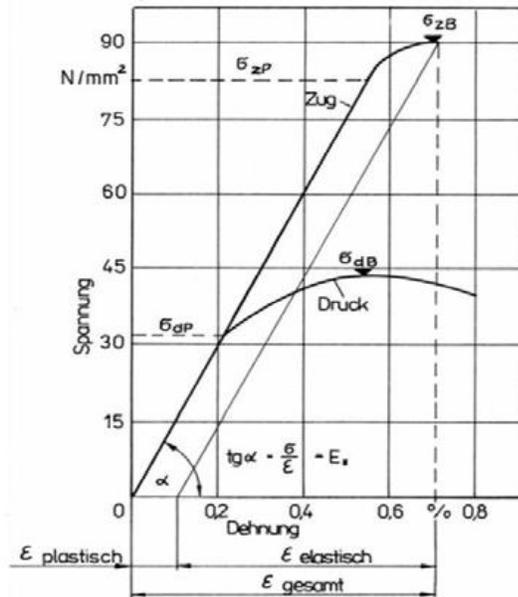
Antwort:

Vollholz, Spanplatte, Waben, Schaumstoff.



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

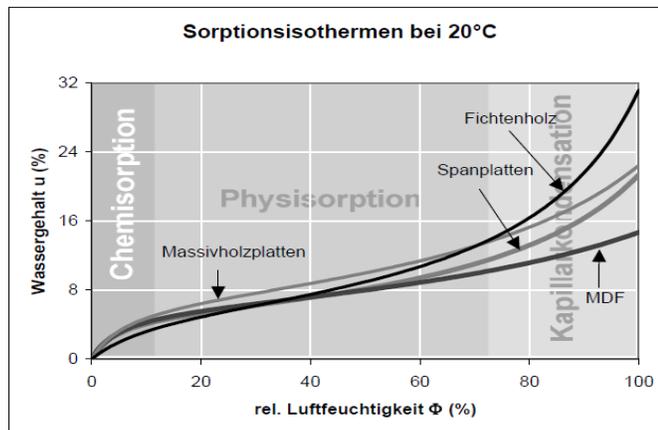
Antwort:



Verhältnis Zugfestigkeit Fichte: 1 (T) : 1.3 (R) : 44 (L).

- 22) Skizzieren Sie in einem Diagramm die Holzfeuchtigkeit von Fichtenholz in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit (für rel. Luftfeuchten von 0 bis 100%; das Holz ist komplett von Luft umgeben). Kennzeichnen Sie in diesem Diagramm auch die drei Phasen des Sorptionsvorgangs. Wie nennt man die Grenzzustände des Systems Holz/Wasser bei 0% und bei 100% relativer Luftfeuchtigkeit?

Antwort:



Darrtrocken, Fasersättigung

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

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

**Antwort:**

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

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

	Vollholz	Faserplatte
Festigkeit		
Aufschlussgrad		
Homogenität		
Isotropie		
Energieeinsatz		
Umweltbeeinträchtigung		
Wärmedämmung		
Oberflächengüte		

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

**Antwort:**

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

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

Grenzzustände: Darrtrocken, Fasersättigung, Wassersättigung.

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

**Antwort:**

Dichte: Mit zunehmender Dichte steigt die Festigkeit.

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

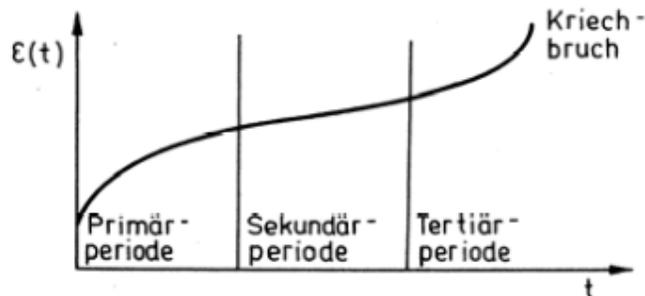
Holzfeuchte: Abnahme der Festigkeit mit Zunahme der Feuchte (bis Fasersättigung); oberhalb der Fasersättigung hat die Feuchte kaum mehr einen Einfluss auf die Festigkeit.

Jahrringlage: Radiale Festigkeit grösser als tangential.

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

**Antwort:**

Primär-, Sekundär-, Tertiärperiode.



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

**Antwort:**

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

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

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

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

- 29) Zeigen Sie anhand eines Diagramms, wie der Holzfeuchtigkeitsgehalt die Zug-, Biege- und Druckfestigkeit von Nadelholz (in Faserlängsrichtung) beeinflusst. Warum wirkt sich eine Holzfeuchtigkeitsänderung unterhalb des

**Fasersättigungspunktes anders auf die Festigkeit auf als diejenige oberhalb des Fasersättigungspunktes?**

**Antwort:**

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

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

- 30) Bei einem Fichtenbrett ist der E-Modul in Faserlängsrichtung (12000 N/mm<sup>2</sup>) 20mal so gross wie der E-Modul senkrecht zur Faserrichtung. Berechnen Sie, wie gross der E-Modul näherungsweise ist, wenn die Belastungsrichtung um 20° von der Faserlängsrichtung abweicht.**

**Antwort:**

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

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

**Antwort:**

Abhängigkeit der Eigenschaften eines Materials von der Richtung.

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

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

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

**Antwort:**

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

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

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

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

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

**Antwort:**

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

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

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

**Antwort:**

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