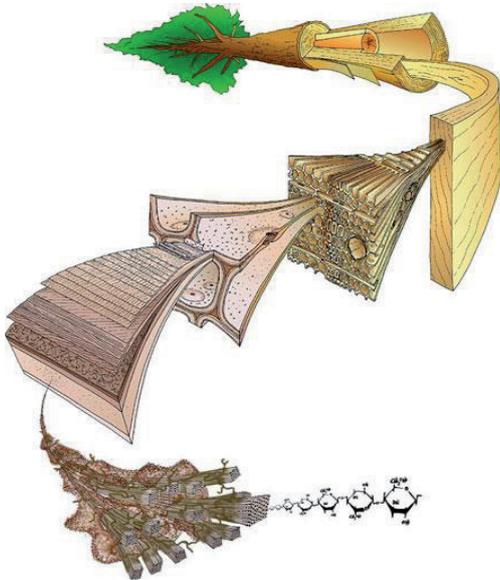


## 2 STAND DES WISSENS

### 2.1 Holz

Holz ist das sekundäre Dauergewebe von Bäumen und Sträuchern. Es wird von der zwischen Rinde und Holz gelegenen, ringförmigen Bildungsschicht, dem Kambium erzeugt. Unter stetiger Zellteilung und Vergrößerung seines Umfangs sondert das Kambium nach innen Holzzellen (Xylem) und nach außen Rindenzellen (Phloem) ab. Es dient der Pflanze zur Wasserleitung, mechanischen Festigung und Stoffspeicherung. Makroskopisch sind die aus Borke und Bast aufgebaute Rinde, das noch lebende Holzgewebe (Splint) sowie abgestorbene Holzbestandteile (Kern) zu erkennen (FENGEL und GROSSER 1976). Eine Übersicht vom optisch erkennbaren Holz über die Anatomie, den Feinbau der Zellwand und der chemischen Zusammensetzung ist in Abbildung 1 zu entnehmen. In Bezug auf die Anatomie und Chemie unterscheiden sich die einzelnen Holzarten voneinander. Im Allgemeinen wird zwischen Nadelhölzern (*Gymnospermae*) und Laubhölzern (*Angiospermae*) unterschieden. Makroskopisch können periodisch auftretende Zuwachszonen vorkommen. Hervorgerufen wird diese Erscheinung durch unterschiedliche Gewebezonen, wobei das weitlumige Frühholz bevorzugt zur Wasser- und Nährsalzleitung in der Vegetationsperiode dient. Das Spätholz hingegen dient zur mechanischen Festigung. Dort sind die Wandstärken der Zellen dicker als im Frühholzgewebe, die Lumen hingegen dünner.



**Abbildung 1** Hierarchischer Aufbau des Holzes (Illustration: Harrington, University of Canterbury, 1996).

#### 1. Makroskopische Ebene

- Unterscheidung in Nadelholz, Laubholz (Ringporer, Zerstreutporer)

#### 2. Anatomische Ebene

- Charakterisierung der Gewebetypen (z.B. Tracheiden, Gefäße, Fasern, Holzstrahlen)

#### 3. Ultrastruktur der Holzzellwand

- Differenzierung innerhalb der Zellwandschichtung

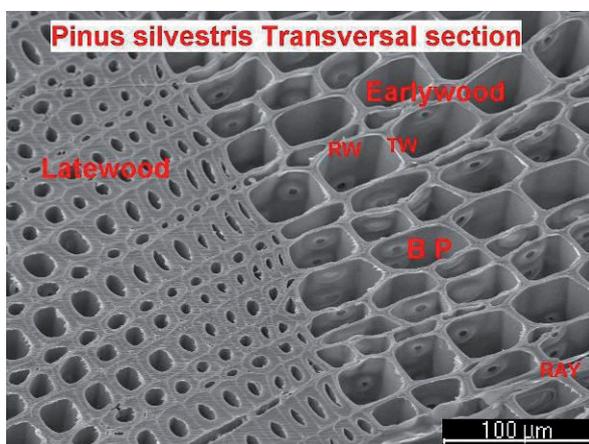
#### 4. Chemische Ebene

- Molekulare Zusammensetzung (z.B. Lignin, Cellulose)

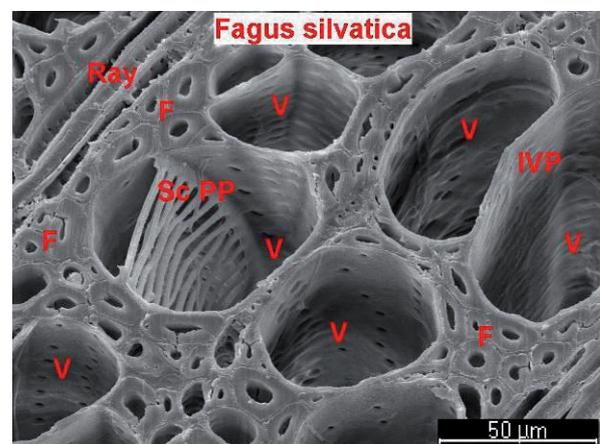
#### 2.1.1 Anatomie

Holz ist in den drei Raumrichtungen – longitudinal, radial und tangential – unterschiedlich aufgebaut. Nadelholz besteht zu 90-95% aus abgestorbenen (prosenchymatischen) Zellen, den Tracheiden (GROSSER 1977). Bei Kiefer sind die Tracheiden zwischen 1.800-4.500  $\mu\text{m}$  lang (WAGENFÜHR 2007). Der verbleibende Anteil am Holz wird aus Parenchymzellen gebildet. Zu diesen zählen nach WAGENFÜHR (2007) bei Kiefernholz anteilig Harzkanäle oder Holzstrahlen (4-7%). Zwischen den einzelnen Zellen befinden sich Verbindungselemente, die Tüpfel (SIAU

1995). Zwischen Tracheiden sind diese Tüpfel behöft. Zwischen Parenchymzellen und Tracheiden ist nur ein einseitiger Hof ausgeprägt. Einfache Tüpfel hingegen sind zwischen den Tüpfeln von Parenchymzellen vorhanden. Im Frühholz sind die Tüpfel im Allgemeinen zahlreicher, breiter im Durchmesser und dünner hinsichtlich der Wanddicke als im Spätholz. Die Tüpfelöffnungen im Nadelholz sind 0,02-8 µm breit (SIAU 1995). Das primär zur mechanischen Festigung gebildete Spätholz ist dickwandiger und weist kleinere Lumen als Frühholztracheiden auf. Nach WAGENFÜHR (2007) beträgt die Wanddicke der Tracheiden im Frühholz von Kiefer durchschnittlich 7 µm, im Spätholz 13 µm. Die Lumenbreiten betragen zwischen 19-54 µm (Frühholz) bzw. 12-25 µm (Spätholz). Abbildung 2 gibt eine anatomische Übersicht zur Kiefer. Longitudinale Parenchymzellen und Holzstrahlen dienen dem Transport bzw. der Speicherung von Nährstoffen (SIAU 1995). In Nadelholz sind Holzstrahlen mit Ausnahme harzkanalführender Typen eine Zelle breit. Buche als Vertreter von Laubholz besitzt 1-25 Zellen breite Holzstrahlen, die eine Höhe bis zu 4.000 µm erreichen (WAGENFÜHR 2007). Generell weist Laubholz eine komplexere Struktur auf. Das Gewebe ist in Gefäße, Fasern, Holzstrahlen und Axialparenchym differenziert (Abb. 3). Die Gefäße erreichen bei Buche Durchmesser von 8-85 µm (WAGENFÜHR 2007). In ringporigen Holzarten sind die Durchmesser von Frühholzgefäßen wie bei Eiche (*Quercus robur*) mit bis zu 350 µm sehr groß und erreichen nach BRAUN (1970) Längen zwischen 5-18 m. Nach SIAU (1995) sind die Tüpfel in Laubholz kleiner verglichen mit denen im Nadelholz und von einer durchgehenden Membran begrenzt. Aufgrund des differenzierten Leitsystems für Wasser und Nährsalze sind Laubholzfasern primär als Festigungsgewebe ausgeprägt. In Buche sind sie zwischen 600-1.300 µm lang und weisen Wanddicken und analoge Lumenbreiten zwischen 4-10 µm auf (WAGENFÜHR (2007). Des Weiteren können als Stoffwechselprodukte insbesondere im Zuge der **Verkernung** Kristalle und organische Depositen (z.B. Tannine) in den Lumen und Zellwänden eingelagert werden. Die Verkernung entspricht dem Alterungsprozess des Holzes, bei dem u.a. die lebenden parenchymatischen Zellen absterben. Von benachbarten Parenchymzellen können die Membranen in Gefäße einsacken und zur Ausbildung von Thyllen führen (SIAU 1995). Neben der Bildung von Thyllen und dem Verschluss der Hoftüpfel ändern sich auch die Gas- und Wassergehalte (FENGEL und GROSSER 1976). Die Tränkbarkeit von Holz wird reduziert, die Dauerhaftigkeit zum Teil erhöht.



**Abbildung 2** Anatomische Ansicht von Kiefer (REM-Querschnitt, E. Bäucker, Forstnutzung Tharandt): RW = Radialwand, TW = Tangentialwand.

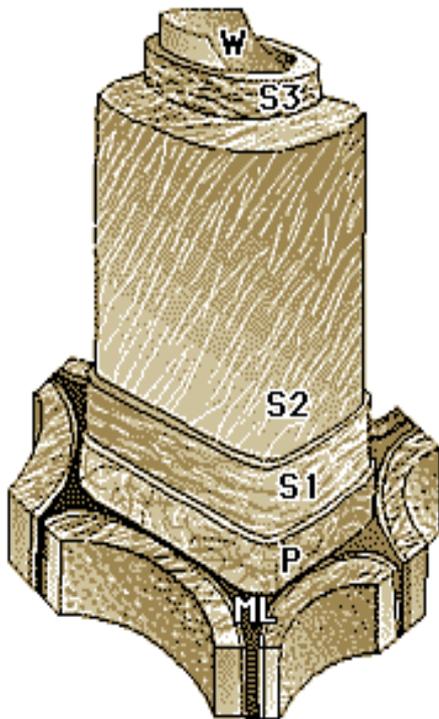


**Abbildung 3** Buchenholz (REM-Querschnitt, E. Bäucker, Forstnutzung Tharandt): V = Gefäß, IVP = Gefäßtüpfel, ScPP = leiterförm. Gefäßdurchbrechung.

## 2.1.2 Ultrastruktur

Die Holzzellwand setzt sich aus verschiedenen Schichten zusammen. Es wird in die Mittellamelle (ML), Primärwand (P) und Sekundärwand (S) unterschieden (Abb. 4). Die Zellwandschichten sind zu verschiedenen Anteilen aus Cellulose, Holzpolyosen und Lignin zusammengesetzt. Die Sekundärwand wird in drei Schichten ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) unterteilt, wobei sich diese Schichten hinsichtlich der Dicke und der räumlichen Orientierung der Cellulosefibrillen unterscheiden (WAGENFÜHR 1999). Etwa 15 parallel aneinandergelagerte Cellulosemoleküle bilden dabei eine Elementarfibrille von ca. 3,5 nm Durchmesser (MÜHLETHALER 1960). Mehrere Elementarfibrillen bilden als nächste Einheit 10-30 nm dicke Mikrofibrillen. Innerhalb der Mikrofibrillen gibt es amorphe Regionen, die für Wasser zugänglich sind und ca. 60 nm lange Abschnitte, wo die Cellulose in kristalliner Form vorliegt (PANSCHIN und DE ZEEUW 1964, SIAU 1995). Die Mikrofibrillen sind zu größeren Einheiten, den etwa 400 nm dicken Makrofibrillen, aggregiert. Eingebettet sind diese in einem Komplex aus Lignin und Holzpolyosen (SIAU 1995).

Benachbarte Holzzellen sind durch die **Mittellamelle** miteinander verbunden. Diese besteht vorwiegend aus Lignin und Pektin. Die Dicke dieser Schicht bewegt sich zwischen 0,1-0,4  $\mu\text{m}$ , kann aber an den Zellwinkeln bis zu 4  $\mu\text{m}$  erreichen (SIAU 1995). Die **Primärwand** ist neben Wasser aus Protopektin, Polyosen, Proteinen und zu ca. 9% aus Cellulose aufgebaut. Die Zellschichtdicke liegt zwischen 0,1-0,2  $\mu\text{m}$ . Die Orientierung der Mikrofibrillen ist unregelmäßig bis kreuzweise (PANSCHIN und DE ZEEUW 1964, FENGEL und GROSSER 1976, SIAU 1995, WAGENFÜHR 1999). Die  $S_1$  der **Sekundärwand** ist im Frühholz zwischen 0,2-0,5  $\mu\text{m}$  und im Spätholz etwa 1  $\mu\text{m}$  dick. Der Winkel der in 3-6 Lagen angeordneten Mikrofibrillen liegt zwischen 60-80° (SIAU 1995, WAGENFÜHR 1999).



**Abbildung 4** Zellwandaufbau nach SELL und ZIMMERMANN 1993).

Die  $S_2$ -Wand nimmt einen Anteil von 60-80% an der gesamten Holzzellwand ein und besitzt damit einen entscheidenden Einfluss u.a. auf das Quell- und Schwindverhalten (SIAU 1995). Der Winkel der in 30-150 Lagen (Frühholz bzw. Spätholz) angeordneten Mikrofibrillen liegt zwischen 10-30° (WAGENFÜHR 1999). Der Anteil von Cellulose ist in der Sekundärwand hoch. Lignin, zum Teil aber auch Harze, Tannine und andere sekundäre Extraktstoffe sind in den etwa 10 nm breiten interfibrillären Hohlräumen inkrustiert (STRASBURGER und SITTE 1998, WAGENFÜHR 1999).

Bei Parenchymzellen wird eine dritte Sekundärwandschicht gebildet.

Diese  $S_3$ -(Tertiär-)Wand ist 0,1-0,2  $\mu\text{m}$  dick und bildet die Grenzschicht zum Lumen. Die Mikrofibrillen sind parallel zur Faserrichtung orientiert (FENGEL und GROSSER 1976). Sie besteht aus überwiegend nicht strukturierten, zum Teil unbekanntem Verbindungen, die zur Ausbildung einer Warzenschicht beispielsweise in den Tracheiden der Kiefer führen. Dieser Schicht wird ein entscheidender Einfluss auf die Feuchtediffusion in die Zellwand zugeschrieben (FENGEL und GROSSER 1976, SIAU 1995, FENGEL und WEGENER 2003).

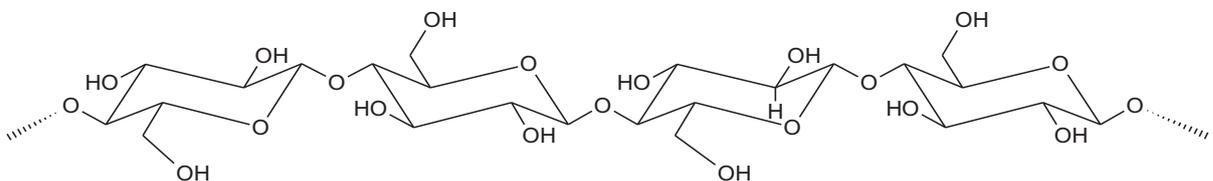
### 2.1.3 Chemische Zusammensetzung

Hauptbestandteile von Holz sind Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) (Tab. 1). Es wird zwischen den Hauptbestandteilen wie Polysacchariden oder Lignin und den Nebenbestandteilen wie beispielsweise Extrakt- oder Mineralstoffen unterschieden. In den gemäßigten Breiten ist Holz überwiegend zu 97-99% aus makromolekularen Substanzen aufgebaut. Die chemische Zusammensetzung und deren Mengenverhältnisse variieren insbesondere bei Lignin und Holzpolyosen (FENGEL und WEGENER 2003).

**Tabelle 1** Elementanteil und organische Verbindungen von Holz nach SERGEJEW (1959) und WAGENFÜHR (2007).

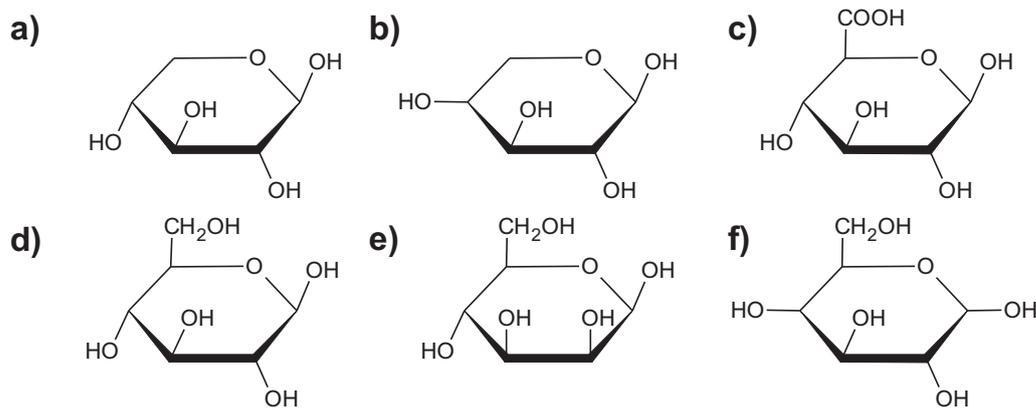
Holzart	Elemente [%]				Organische Verbindungen [%]				pH Wert
	C	H	O	N	Zucker	Cellulose	Pentosan	Lignin	
<i>Pinus sylvestris</i>	-	-	-	-	64 – 72	42 – 52	8 – 13	26 – 31	5,1
<i>Fagus sylvatica</i>	50,9	5,1	42,1	0,9	76 – 85	34 – 46	18 – 26	12 – 23	5,1 – 5,4

**Cellulose** stellt mit 40-50% Massenanteil die Hauptkomponente im Holz dar. Die gleichmäßig aufgebaute Substanz besteht aus  $\beta$ -D-Glucosemolekülen, die zu langen, unverzweigten Ketten verknüpft sind (Abb. 5). Zwei miteinander verknüpfte Cellulosebausteine (Cellobiose) sind ca. 1,03 nm lang. Der Polymerisationsgrad liegt dabei zwischen 7.000-10.000 Glucosemonomeren (FENGEL 1968), was einer Gesamtlänge von 4-5  $\mu\text{m}$  entspricht (GORING und TIMELL 1962). Jedes innerhalb des Cellulosepolymers eingebundene Cellulosemolekül besitzt drei Hydroxylgruppen, die mit Wassermolekülen Wasserstoffbrücken bilden können (SIAU 1995).



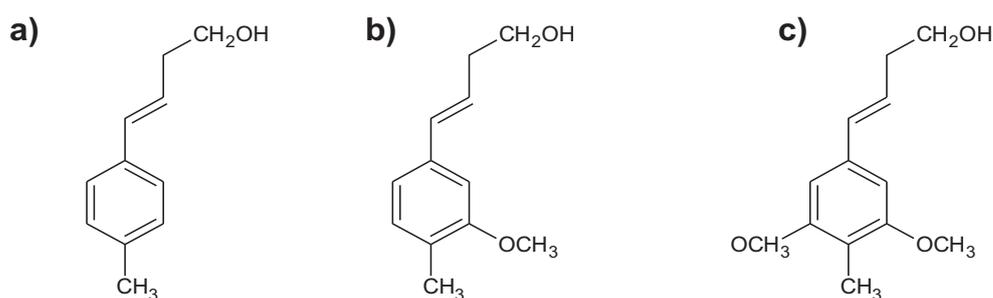
**Abbildung 5** Aufbau eines Cellulosemoleküls nach FENGEL und WEGENER (2003).

**Holzpolyosen** sind amorphe Polysaccharide unterschiedlich ausgeprägter Struktur. Diese Stoffe sind mit Lignin und Cellulose in Form glykosidischer Bindungen innerhalb der Zellwand verknüpft. Allerdings sind sie mit einem Polymerisationsgrad von ca. 1.000 kürzer. Holzpolyosen sind verzweigt und besitzen Seitenketten. Die monomeren Komponenten sind Hexosen (Glucose, Mannose, Galaktose) und Pentosen (Arabinose, Xylose). Des Weiteren bestehen Polyosen aus Uronsäuren (Glukuronsäure, Galakturonsäure). In Laubholz kommen hauptsächlich Pentosen, in Nadelholz Hexosen und Pentosen vor (Abb. 6).



**Abbildung 6** Formeln einiger Zuckerbestandteile von Polyosen nach FENGEL und WEGENER (2003). a)  $\beta$ -D-Xylose. b)  $\alpha$ -L-Arabinopyranose. c)  $\beta$ -D-Glukuronsäure. d)  $\beta$ -D-Glukose. e)  $\beta$ -D-Mannose. f)  $\alpha$ -D-Galaktose.

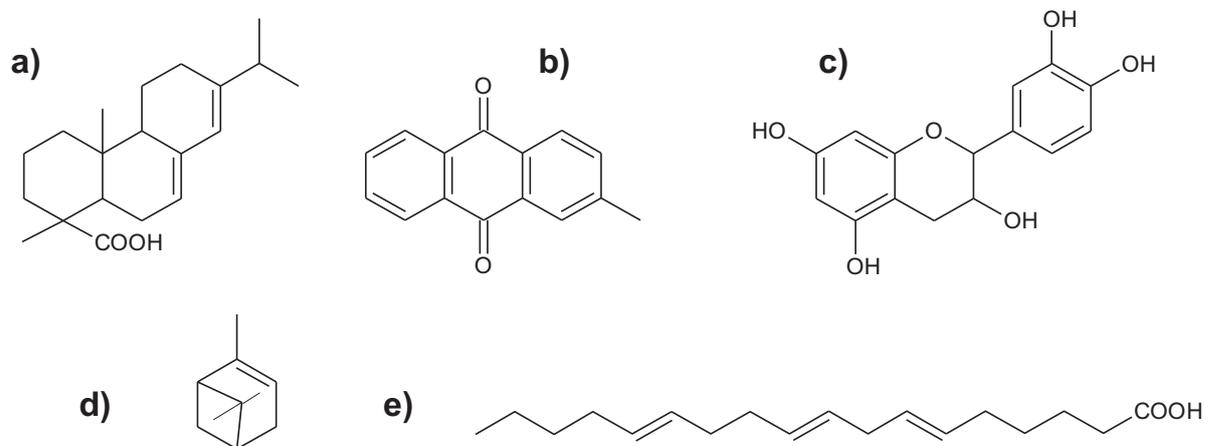
**Lignin** kommt in Holz mit einem Masseanteil zwischen 20-40% vor (FENGEL und WEGENER 2003). Das Polymer ist dreidimensional aufgebaut. Es besteht aus den Phenylpropaneinheiten: p-Cumarylalkohol, Coniferylalkohol und Sinapylalkohol (Abb. 7). Nadelholz ist hauptsächlich aus Coniferylalkoholen (Guaiacyllignin) aufgebaut. Laubholz hingegen besteht vorwiegend aus Coniferyl- und Sinapylalkoholen (Syringyllignin). Lignin ist vorwiegend in der Mittellamelle und der S<sub>2</sub>-Zellwandschicht inkrustiert (FENGEL und WEGENER 2003). Der Einbau der monomeren Ligninbausteine und die anschließende Polymerisierung im Zuge der Zelldifferenzierung werden als Lignifizierung bezeichnet (MOHR und SCHOPFER 1992). Die Füllung der Zellwandhohlräume verstärkt die Zellwand, erhöht die Druckfestigkeit und Sprödigkeit und verringert das Quellverhalten. Im Allgemeinen besitzen Nadelhölzer höhere Ligninanteile bzw. niedrigere Holzpolyosevorkommen als Laubholz. Auch liegen die Ligningehalte für einige Holzarten deutlich höher wie bei Pockholz (*Guaiacum officinale*) mit 35-40% (WAGENFÜHR 2007) oder Schlangenhholz (*Brosimum guaianense*) mit ca. 39% (SCHOLZ *et al.* 2007).



**Abbildung 7** Grundbausteine des Lignins nach FENGEL und WEGENER (2003). a) p-Coumarylalkohol. b) Coniferylalkohol. c) Sinapylalkohol.

Im Zelllumen oder in der Zellwand von Holz sind zum Teil weitere **Nebenbestandteile** eingelagert. In den gemäßigten Breiten betragen deren Anteile am Holz etwa 1-3% (FENGEL und WEGENER 2003). Anorganische Verbindungen sind in einigen Holzarten beispielsweise Kristalle wie Calciumoxalat (SCHOLZ *et al.* 2007, 2010a) oder Silica (RICHTER 1980). Viele Holzarten bilden **sekundäre Inhaltsstoffe** wie Terpene und Harze aus (FENGEL und WEGENER 2003). Nach

HARZMANN (1988) und WAGENFÜHR (1999) kann ein hoher Anteil derartiger Nebenbestandteile zu einer erschwerten Bearbeitung des Holzes führen. Organische Nebenbestandteile sind beispielsweise Lignane, Stilbene oder Flavonoide (Abb. 8), die bevorzugt im Kernholz eingelagert werden (FENGEL und WEGENER 2003). Obwohl die genannten Verbindungen oft nur einen geringen Holzanteil ausmachen, üben sie einen entscheidenden Einfluss auf den Geruch, die Farbe, Dauerhaftigkeit (HARZMANN 1988, FENGEL und WEGENER 2003) aber auch die Tränkbarkeit des Holzes aus. Des Weiteren sind speziell in den lebenden Parenchymzellen des Splints Stärke, Fette oder Wachse (**primäre Inhaltsstoffe**) gespeichert (Abb. 8). ASSARSSON und ÅKERLUND (1966) fanden für darrtrockenes Kiefernholz Fettanteile von 0,4% bzw. 0,09% Wachs. Diese Stoffe tragen eher zu einer Herabsetzung der Resistenz gegenüber Pilzen oder Insekten bei (HARZMANN 1988). Einige tropische Kernhölzer können über 15% Extraktstoffanteile oder Aschegehalte von bis zu 5% (*Acacia spp.*) aufweisen (HARZMANN 1988, FENGEL und PRZYKLENK 1989, SCHOLZ *et al.* 2010 a).



**Abbildung 8** Ausgewählte Nebenbestandteile von Holz aus FENGEL und WEGENER (2003). **a)** Abietinsäure (Harzsäure vorwiegend in Kiefern- und Fichtenholz). **b)** Tectochinon. (Chinon, Vorkommen in *Tectona grandis*). **c)** Catechin (Flavan, Vorkommen in *Acacia spp.* und *Schinopsis spp.*). **d)**  $\alpha$ -Pinen (Monoterpen von Nadelholz). **e)** Linolensäure (Fettsäure).

## 2.1.4 Dauerhaftigkeit

### 2.1.4.1 Abiotische Einflussfaktoren

Holz unterliegt verschiedenen abiotischen Degradierungsprozessen. Neben UV Einstrahlung, tragen auch Wind, Eis, Wasser oder Feuer zur Abrasion bzw. Zerstörung des Holzsubstrats bei. Sonnenstrahlung beeinflusst den Holzabbau bis zu einer Tiefe von ca. 200  $\mu\text{m}$  oberflächlich (BROWNE und SIMONSON 1957). Bezogen auf die gesamten Holzbestandteile hat Lignin einen Anteil von 80-95% am Absorptionskoeffizienten der Strahlung. Es baut sich unter Autoxidation rasch ab (KLEINERT 1970). Es kommt auch zum Celluloseabbau, welcher durch eine Verringerung des Polymerisationsgrades, Gewichtsverlust und einer Reduktion von  $\alpha$ -Cellulose charakterisiert ist (FENGEL und WEGENER 2003). Dieser Effekt zeigt sich in Form von holzspezifischen Verfärbungen (SANDERMANN und SCHLUMBOM 1962). Durch den partiellen Abbau von Holzkomponenten und deren Auswaschung raut die Holzoberfläche auf (FUTÓ

1976). Die mechanische Erosion -beispielsweise durch Wind- verläuft mit ca. 5-8 mm in 100 Jahren (FEIST und MRAZ 1978 b) vergleichsweise langsam. Feuchtigkeit im Holz begünstigt die Kolonisierung durch Mikroorganismen. Des Weiteren werden phenolische Abbauprodukte aus dem Holz ausgewaschen. Neben durch Quellen und Schwinden verursachten Rissen kann Wärme in Kombination mit Wasser chemische Reaktions- und Abbauprozesse beschleunigen. Bei Abkühlung unter 0°C dehnt sich das Volumen von Wasser um ca. 9% aus (RIEDEL *et al.* 1999), was zu einer mechanischen Schädigung des Holzes führen kann.

#### **2.1.4.2 Resistenz gegenüber Pilzen**

Pilzliche Zellen werden als Hyphen bezeichnet. Ihre Zellwände bestehen aus dem Makromolekül Chitin, d.h. einer Vielzahl von  $\beta$ -1,4-glykosidisch verknüpften N-Acetylglucosamin-Monomeren. Das Geflecht zahlreicher Hyphen wird als Mycel bezeichnet (SCHMIDT 1994). Der Hallimasch *Armillaria ostoyae* erreichte ein Alter von ca. 2.400 Jahren und eine Ausdehnung von 900 ha in Oregon (SCHWARZE und FERNER 2003).

Die Holzbesiedelung durch Pilze und Bakterien erfordert eine Holzfeuchte von mehr als 20% (GROSSER 1985, WEIB *et al.* 2000). Holzzerstörende Pilze benötigen zur enzymatischen Zersetzung der Zellwand Holzfeuchten zwischen 30-60% (WEIB *et al.* 2000, MILITZ und MAI 2008). Einige Pilze können Holz bei Feuchten zwischen 17-20% abbauen, indem Wasser über das Mycel von Feuchtequellen transportiert wird (GROSSER 1985). In der Regel wirken Temperaturen ab 0°C (Gefrierpunkt des Wassers) und ab 40-50°C (Denaturierung von Protein) als limitierend für die Pilzaktivität (SCHMIDT 1994). Neben genügend Sauerstoff ist auch der pH-Wert aufgrund der Beeinflussung der Enzymaktivität wichtig (SCHWANTES *et al.* 1976). Basidiomyceten bevorzugen einen pH von 4-6 bei einer Spanne von 2,5-9 (LIESE 1950, THÖRNQUIST *et al.* 1987). Moderfäulepilze tolerieren Werte bis pH 11. Generell führen sehr saure bzw. basische pH-Werte zur Denaturierung der Enzyme (SCHMIDT 1994). Aufgrund ihrer Stoffwechsellaktivität können viele Pilze nicht nur die Umgebungsfeuchte, sondern auch die pH-Werte des Holzsubstrats verändern (SCHWANTES *et al.* 1976, HUMAR *et al.* 2001). Holz ist verglichen mit anderem Pflanzenmaterial relativ nährstoffarm (KLINGE 1976, KLINGE und RODRIGUEZ 1968). Viele holzzersetzende Pilze sind darum in der Lage, Nährstoffe von absterbenden Hyphen in neue Wachstumszentren zu verlagern (DOWDING 1976).

Nach der Art der Holzzerstörung wird in Braunfäule (Destruktionsfäule), Weißfäule (Korrosionsfäule) und Moderfäule unterschieden. Braunfäulepilze wachsen vorwiegend in den Zelllumina in engem Kontakt zur Tertiärwand (SCHMIDT 2006) und bauen vorwiegend Cellulose ab. Bei der Weißfäule werden Cellulose und Lignin gleichermaßen abgebaut. Das Holz lockert sich faserig auf und färbt sich hell. Moderfäulepilze siedeln innerhalb der Zellwände und lösen diese enzymatisch auf. Die Cellulosen und Holzpolyosen werden abgebaut. Die dabei entstehenden Hohlräume werden als Kavernen bezeichnet (WEIB *et al.* 2000).

Die makromolekularen Holzbausteine (Cellulose, Lignin, Holzpolyose) sind für die direkte Aufnahme in die Hyphe über Öffnungen von ca. 10 nm zu groß. Es erfolgt eine extrazelluläre Aufspaltung in kleine Bruchstücke über Ektoenzyme (SCHMIDT 1994). Der mikrobielle Holzabbau wird durch die Erreichbarkeit der Holzkomponenten, d.h. die Ultrastruktur des

Holzes beeinflusst (LIESE 1981). Eine höhere Kristallinität der Cellulose und inkrustiertes Lignin erschweren den pilzlichen Abbau beispielsweise für viele Braunfäulepilze. Die Ursachen für den erschwerten mikrobiellen Ligninabbau sind in den aromatischen Ringen und der schwierigeren enzymatischen Zugänglichkeit der zwischen den einzelnen Grundbausteinen bestehenden Bindungen zu sehen. Moderfäule demethyliert die aromatischen Ringe. Lediglich Weißfäulepilze bauen Lignin effektiv ab (SCHMIDT 1994). Nach ZABEL und MORRELL (1992) wird Syringillignin schneller als Guaiacyllignin abgebaut. Holzpolyosen werden durch Braunfäule- und Weißfäulepilze unter Abgabe von Oxalsäure depolymerisiert. Durch den Abbau der Holzpolyose und amorphen Cellulose werden die erweiterten Porenräume für Hyphen und Enzyme zugänglich (GREEN *et al.* 1991, MU *et al.* 1996). Moderfäulepilze hingegen scheiden vermehrt Enzyme (Xylanase) aus (SCHMIDT *et al.* 1979). Der Abbau von Cellulose erfolgt durch einen Cellulasekomplex aus drei Enzymgruppen (Eriksson *et al.* 1990). Weitere Untersuchungen gehen von der Beteiligung von Oxalsäure bei der Depolymerisierung von Cellulose aus. Dabei wird  $Fe^{3+}$  zu  $Fe^{2+}$  reduziert, welches aus  $H_2O_2$  ein reaktives Hydroxylradikal zum Celluloseabbau bildet (TANAKA *et al.* 1992, GREEN *et al.* 1993, SCHMIDT 1994). Die in Wasser gelösten Nährstoffe werden über die Hyphen aufgenommen, die ein niedrigeres Wasserpotential als das Substrat aufweisen (SCHMIDT 2006).

Pilze verursachen weltweit hohe ökonomische Schäden durch die Zerstörung des Holzes (z.B. Basidiomyceten, Moderfäule) oder durch den Wert des Holzes herabsetzende Verfärbungen (z.B. Bläue). Beispielsweise entstehen bei Exporten von neuseeländischer *Pinus radiata* nach Japan finanzielle Schäden in Höhe von ca. 50 Mio. € pro Jahr (THWAITES *et al.* 2004).

#### **2.1.4.3 Resistenz gegenüber Termiten**

Termiten bilden Kasten aus, deren Angehörige (Arbeiter, Soldaten, König/Königin) einen Polymorphismus aufweisen und verschiedene Funktionen im Staat haben. Sie ernähren sich vorwiegend von der Cellulose des Holzes. Wirtschaftlich sind sie regional bedeutend, da viele Arten trockenes Holz befallen und Staaten mit mehreren Millionen Individuen bilden können. Termiten sind mobil und einzelne Staaten können durch Ausbildung von Ersatzgeschlechtstieren eine lange Lebensdauer haben (BECKER 1977). Es sind mehr als 2.000 Arten bekannt (GROSSER 1985). KUKOR *et al.* (1988) beschreiben die Aufnahme cellulosespaltender Enzymkomplexe pilzlichen Ursprungs durch Termiten. Das ermöglicht vielen Xylophagen den Celluloseabbau. Auch eine stoffliche Lignindegradation wurde bei Termiten nachgewiesen (BUTLER und BUCKERFIELD 1979, COOKSON 1987). Cellulolytische Enzyme werden von Termiten und deren symbiontischen Bakterien synthetisiert (SCHULZ *et al.* 1986). Nach SCHLEGEL (1992) zieht sich der Holzabbau durch Pilze aufgrund der Unfähigkeit zur mechanischen Zerkleinerung, im Gegensatz zu den Termiten, über Monate bis Jahre hin. Durch die Fähigkeit den Hauptanteil des Holzsubstrats zu verdauen, schädigen Termiten Holz und gefährden die Statik von Konstruktionen wie Gebäuden oder Brücken. Weltweit werden durch Termiten verursachte Schäden auf etwa 34 Mrd. € geschätzt (KORB (2007)). Die Verwendung termitenresistenter Kernholzarten oder behandelter Hölzer sind in vielen Ländern eine wirtschaftliche Notwendigkeit.

## 2.1.5 Konventioneller Schutz und Tränkbarkeit von Holz

Nach MILITZ und MAI (2008) werden **konventionelle Holzschutzmittel** nach ihrer chemischen Konstitution eingeteilt. Die hydrophoben Kreosote (Steinkohlenteeröle) bieten mit einer Anwendungsdauer zwischen 20-50 Jahren (KOMORA 1999) langfristigen Schutz gegen Pilze, Insekten und marine Holzschädlinge. Sie gelten als gesundheitlich bedenklich, besitzen einen starken Geruch und sind schlecht zu beschichten. Zu den wasserlöslichen Schutzmitteln zählen Salze bzw. Salzgemische beispielsweise auf Basis von Fluor oder Bor. Trotz ihrer insektiziden und fungiziden Wirkung sind die Verbindungen leicht auszuwaschen, was eine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellt. In Verbindung mit Kupfer und / oder Arsen werden chromhaltige Mittel eingesetzt. Chrom dient dabei zur Fixierung und bewirkt damit auch einen bedingten Schutz vor UV Strahlung (MILITZ und MAI 2008). Dadurch ist zwar eine hohe biologische Wirksamkeit gegeben, die allerdings nur mit zum Teil sehr giftigen Verbindungen erreicht wird. Nach MILITZ und MAI (2008) werden des Weiteren Ammoniumverbindungen eingesetzt. Diese reagieren schnell mit den Holzbestandteilen zulasten einer tiefgehenden Penetration in das Holz. Gegenüber Moderfäule wirken sie kaum. Weitere Schutzmittel können auf Lösungsmitteln wie Testbenzin basieren, die organische Fungizide (z.B. Triazole, Phenylsulfamide) bzw. Insektizide (z.B. synthetische Pyrethroide, Flurox) enthalten.

Neben Streichen und Tauchen wird für eine tiefgehende Einbringung des Schutzmittels eine Reihe von **Tränkverfahren** angewendet. Verbreitet sind

**Vakuum-Druck-Verfahren** für trockene Hölzer (Evakuieren von Luft, Einpressen der Lösung)

**Wechseldruckverfahren** für nasse, schwer imprägnierbare Hölzer (bis 80% Holzfeuchte),

**Doppel-Vakuum-Verfahren** für maßhaltige Hölzer (drucklos; niedrige Einbringmenge),

**Lowry-Verfahren** zur Einsparung von Schutzmittellösung (hoher Druck ohne Vakuum) und das

**Royalverfahren** zur Veredelung kesseldruckimprägnierten Holzes (im Sparverfahren imprägniertes Holz wird in fixierendem Öl gekocht und damit gleichzeitig hydrophobiert und getrocknet) (MILITZ und MAI 2008).

Je nach ihrer Anatomie, Holzfeuchte, des Kern- und Splintholzanteils sind Holzarten unterschiedlich gut zu imprägnieren. Tabelle 2 zeigt die angegebene Klassifizierung der Tränkbarkeit nach EN 350-2 (1994).

**Tabelle 2** Klassifikation der Tränkbarkeit von Holz nach EN 350-2 (1994), modifiziert.

Klasse	Beschreibung	Erklärung	Beispiel
1	gut tränkbar	einfach zu tränken; Schnittholz wird bei Druckbehandlung ohne Schwierigkeiten vollständig durchdrungen	Kiefernspint, Buche
2	mäßig tränkbar	ziemlich einfach zu tränken; in der Regel ist vollständige Durchdringung nicht möglich, nach 2 h oder 3 h Druckbehandlung kann jedoch in Nadelhölzern mehr als 6 mm Eindringung senkrecht zur Faserrichtung erreicht werden, und in Laubhölzern wird ein großer Anteil der Gefäße durchdrungen	Esche Tanne
3	schwer tränkbar	schwierig zu tränken; 3 h bis 4 h Druckbehandlung ergeben nicht mehr als 3 mm bis 6 mm Eindringung senkrecht zur Faserrichtung	Kiefern Kern Fichte
4	sehr schwer tränkbar	praktisch unmöglich zu tränken; nimmt auch nach 3 h bis 4 h Behandlungsdauer nur wenig Schutzmittel auf, Eindringung sowohl in Längsrichtung als auch senkrecht dazu minimal	Kiefern Kern Fichte