

André Wagenführ
Frieder Scholz (Hrsg.)

Taschenbuch der Holztechnik



HANSER

Wagenführ/Scholz (Hrsg.)
Taschenbuch der Holztechnik

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. *André Wagenführ*, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. *Frieder Scholz*, Hochschule Rosenheim

Autoren und Mitarbeiter

Dr.-Ing. *Rico Emmler*, Institut für Holztechnologie Dresden, (Abschn. 3.3)

Prof. Dr.-Ing. *Oskar Faix*, Institut für Holzchemie und chemische Technologie des Holzes Hamburg, (Abschn. 1.3)

Dr.-Ing. *Hans-Jürgen Gittel*, Marketing und Unternehmensberatung Nürtingen, (Abschn. 3.2)

Dr.-Ing. *Christian Gottlöber*, Technische Universität Dresden, (Kap. 2)

Prof. Dr.-Ing. *Detlef Kröppelin*, Dresden, (Kap. 5)

Prof. Dipl.-Ing. *Torsten Leps*, Hochschule Rosenheim, (Abschn. 3.4)

Prof. Dr. *Carsten Mai*, Georg-August-Universität Göttingen, (Abschn. 4.2, 4.3)

Prof. Dr. *Holger Militz*, Georg-August-Universität Göttingen, (Abschn. 4.2, 4.3)

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. *Peter Niemz*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich/Berner Fachhochschule, Biel, (Abschn. 1.4, Kap. 2)

Prof. Dipl.-Ing. (FH) *Maximilian Ober*, Hochschule Rosenheim, (Abschn. 3.3)

Prof. Dr.-Ing. *Frieder Scholz*, Hochschule Rosenheim, (Abschn. 3.2)

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. *Alfred Teischinger*, Universität für Bodenkultur Wien, (Abschn. 4.1)

Prof. Dr.-Ing. *André Wagenführ*, Technische Universität Dresden, (Abschn. 1.2, 2.2.7, 2.2.9, 3.1)

Dr. rer. nat. *Rudi Wagenführ*†, Dresden, (Abschn. 1.1, 1.2)

Taschenbuch der Holztechnik

herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ und
Prof. Dr.-Ing. Frieder Scholz

3., aktualisierte Auflage
Mit 403 Bildern und 84 Tabellen



FACHBUCHVERLAG LEIPZIG
im Carl Hanser Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-45440-8

E-Book-ISBN 978-3-446-45441-5



Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Umschlagbild: Reduzier-Bandsägeanlage (EWD Sägetechnik Reutlingen)

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

© 2018 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Manuel Leppert, M. A.

Herstellung: Katrin Wulst

Satz: Werksatz Schmidt & Schulz GmbH, Gräfenhainichen

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

Vorwort

Die Geschwindigkeit der Neuerungen in der Technik steigt unaufhaltsam, Fortbildung in der Industrie wandelt sich zum kontinuierlichen Prozess. Insbesondere der Wirtschaftszweig der Holzverarbeitung an Hochtechnologie-Standorten steht – bedingt durch weltweite Entwicklungen – unter einem starken Preisdruck, der effiziente Produktionsprozesse erfordert.

Vor diesem Hintergrund fasst dieses Taschenbuch den aktuellen technischen Stand der Holzbearbeitung und -verarbeitung zusammen. Das Buch ist ein breit angelegtes Lehr- und Nachschlagewerk, in dem alle Aspekte der Wertschöpfungskette in der Holzverarbeitung „ab dem Rundholzplatz“ bis zur Konstruktion und Produktion der Endprodukte angesprochen werden. Es gibt übersichtlich Antworten auf die häufigsten Fragestellungen und für weitergehende Probleme Hinweise auf die entsprechende Literatur. Das Buch soll damit ein wertvoller, stets greifbarer Begleiter in Studium und Beruf sein – eben ein Taschenbuch.

Bedingt durch die breite Anlage und Fülle der Themen war die Mitarbeit einer Vielzahl von Autoren notwendig, die alle führende Fachleute auf ihren Gebieten sind. Ihnen allen und insbesondere Rudi Wagenführ, der während dieser Nachauflage verstorben ist, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Der besondere Dank der Herausgeber gilt dem Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, hier speziell Jochen Horn, der die Anregung zu diesem Taschenbuch gab.

Dresden/Rosenheim, November 2017

*A. Wagenführ
F. Scholz*

Inhaltsverzeichnis

1 Roh- und Werkstoff Holz	13
1.1 Einführung	13
1.2 Anatomie des Holzes	14
1.2.1 Holzstrukturuntersuchungen/Holzstrukturanalysen	14
1.2.1.1 Was ist Holz?	14
1.2.1.2 Holzanatomische Untersuchungsmethoden	15
1.2.1.3 Die wichtigsten Holzstrukturmerkmale	16
1.2.1.4 Strukturveränderungen	39
1.2.2 Holzarten	42
1.2.2.1 Benennungen	42
1.2.2.2 Bestimmungen	44
1.3 Chemie des Holzes	47
1.3.1 Holz als Mikro- und Nanoverbundpolymer	47
1.3.2 Cellulose	50
1.3.3 Hemicellulosen	54
1.3.4 Lignine	58
1.3.5 Extraktstoffe	64
1.4 Physik des Holzes	75
1.4.1 Übersicht zu den wesentlichen Holzeigenschaften und wichtigen Einflussfaktoren	75
1.4.1.1 Einteilung der Holzeigenschaften	75
1.4.1.2 Wesentliche Einflussfaktoren auf die Eigen- schaften	76
1.4.2 Verhalten gegenüber Feuchte	77
1.4.2.1 Sorptionsverhalten und kapillare Wasserauf- nahme	77
1.4.2.2 Quellen und Schwinden	82
1.4.3 Dichte	86
1.4.4 Thermische Eigenschaften	87
1.4.5 Elektrische Eigenschaften	89
1.4.6 Optische Eigenschaften	89
1.4.7 Akustische Eigenschaften	90
1.4.8 Alterung und Beständigkeit	92
1.4.9 Elastomechanische und rheologische Eigen- schaften	93
1.4.9.1 Übersicht zu wichtigen Einflussgrößen	93
1.4.9.2 Elastizitätsgesetz und Spannungs-Dehnungs- Diagramm	94
1.4.9.3 Rheologische Eigenschaften	102
1.4.9.4 Festigkeitseigenschaften	106
Literaturverzeichnis	116

Weiterführende Literatur	118
Anlagen	119
2 Werkstoffe aus Holz	127
2.1 Übersicht zu den Holzwerkstoffen	127
2.1.1 Vollholz	128
2.1.2 Holzwerkstoffe	128
2.2 Struktureller Aufbau und wesentliche Einflussfaktoren auf die Eigenschaften ausgewählter Holzwerkstoffe	131
2.2.1 Allgemeine Gesetzmäßigkeiten der Werkstoffbildung	131
2.2.2 Klebstoffe	135
2.2.2.1 Physikalisch abbindende Klebstoffe	136
2.2.2.2 Chemisch reagierende Klebstoffe	137
2.2.3 Werkstoffe auf Vollholzbasis	140
2.2.4 Werkstoffe auf Furnierbasis	141
2.2.5 Werkstoffe auf Spanbasis	143
2.2.6 Werkstoffe auf Faserbasis	146
2.2.7 Verbundwerkstoffe	149
2.2.8 Engineered Wood Products	153
2.2.8.1 Furnierschichtholz (Laminated Veneer Lum- ber, LVL)	154
2.2.8.2 Furnierstreifenholz (Parallel Strand Lumber – PSL)	155
2.2.8.3 Spanstreifenholz (Laminated Strand Lum- ber – LSL)	155
2.2.8.4 Scrimber	155
2.2.8.5 Verbundsysteme	155
2.2.9 Wood Plastic Composites (WPC)	155
2.3 Eigenschaften von Holzwerkstoffen	157
2.3.1 Übersicht	157
2.3.2 Physikalische Eigenschaften	159
2.3.2.1 Verhalten gegenüber Feuchte	159
2.3.2.2 Rohdichte	167
2.3.2.3 Sonstige Eigenschaften	169
2.3.3 Elastomechanische und rheologische Eigen- schaften	176
2.3.3.1 Übersicht	176
2.3.3.2 Kenngrößen und deren Bestimmung	181
2.3.3.3 Rheologische Eigenschaften	185
2.3.3.4 Festigkeitseigenschaften	186
2.4 Technologie der Herstellung von Holzwerkstoffen	193
2.4.1 Allgemeine Entwicklungstendenzen	193
2.4.2 Werkstoffe auf Vollholzbasis	194
2.4.2.1 Brettschichtholz	194
2.4.2.2 Massivholzplatten	196

2.4.3 Werkstoffe auf Furnierbasis (Lagenhölzer)	199
2.4.3.1 Technologische Grundoperationen	199
2.4.3.2 Fertigungsablauf	203
2.4.4 Werkstoffe auf Spanbasis	206
2.4.4.1 Technologische Grundoperationen	206
2.4.4.2 Fertigungsablauf	225
2.4.4.3 Spezielle Holzspanwerkstoffe	226
2.4.5 Werkstoffe auf Faserbasis	231
2.4.5.1 Technologische Grundoperationen	231
2.4.5.2 Fertigungsablauf	243
2.4.5.3 Sonderverfahren	245
2.4.6 Verbundwerkstoffe	245
2.4.6.1 Technologische Grundoperationen	245
2.4.6.2 Fertigungsablauf	248
2.5 Anlagen zur Prozesssteuerung und -überwachung	248
2.6 Einsatzmöglichkeiten von Holzwerkstoffen	249
Quellen und weiterführende Literatur	256
3 Holzbearbeitung	260
3.1 Umformen	260
3.1.1 Holzbiegen	261
3.1.2 Tiefziehen von Holz und Holzwerkstoffen	262
3.2 Oberflächen bildende Bearbeitungsverfahren	263
3.2.1 Begriffe	263
3.2.2 Einführung und Grundlagen	266
3.2.2.1 Trennen ohne Schneidkeil	266
3.2.2.2 Trennen mit Schneidkeil	267
3.2.2.3 Kinematik und Geometrie des Spanens mit geometrisch bestimmten Schneiden	269
3.2.2.4 Zerspanungskräfte und Zerspanungsleistung	277
3.2.3 Baugruppen von Holzbearbeitungsmaschinen	282
3.2.3.1 Maschinengestelle	282
3.2.3.2 Antriebe	285
3.2.3.3 Führungen	291
3.2.3.4 Wellen und Lagerungen	294
3.2.3.5 Lagemessung, Regelung	295
3.2.3.6 Schneidwerkstoffe und Verschleiß	297
3.2.4 Sägen	299
3.2.4.1 Kreissägen	299
3.2.4.2 Zerspanen	308
3.2.4.3 Bandsägen	311
3.2.4.4 Kettensägen	313
3.2.4.5 Gattersägen	314
3.2.5 Fräsen und Hobeln	315

3.2.5.1	Planhobeln (Planfräsen)	315
3.2.5.2	Universal- und Profilhobeln (Profilfräsen)	319
3.2.5.3	Tischfräsen	321
3.2.5.4	CNC-Oberfräsen	323
3.2.5.5	Kantenbearbeitungen	329
3.2.5.6	Weitere Fräsverfahren	334
3.2.6	Bohren	334
3.2.6.1	Bohrwerkzeuge	334
3.2.6.2	Bohrmaschinen	335
3.2.7	Drehen und Drechseln	338
3.2.8	Schleifen	339
3.2.8.1	Grundlagen	340
3.2.8.2	Schleifmittel	342
3.2.8.3	Maschinenkonzepte	344
3.2.9	Spanloses Trennen	350
3.2.9.1	Spalten	351
3.2.9.2	Schälen und Messern	351
3.2.9.3	Stanzen – Schneiden	353
3.3	Oberflächenbeschichtung	353
3.3.1	Oberflächenbeschichtung mit flüssigen Materialien	353
3.3.1.1	Voraussetzungen für gute Oberflächenqualität	354
3.3.1.2	Lackrohstoffe	356
3.3.1.3	Lacksysteme	360
3.3.1.4	Applikationsverfahren	362
3.3.1.5	Lacktrocknen und Härten	378
3.3.2	Beschichtung mit festen und pulverförmigen Stoffen	391
3.3.2.1	Vorbehandlungsverfahren	391
3.3.2.2	Materialien	393
3.3.2.3	Applikationsverfahren	396
3.4	Prüfung von Holz und Holzwerkstoffen	409
3.4.1	Normung und Einzelzulassung	411
3.4.2	Güteüberwachung und Kennzeichnung	412
3.4.3	Prüfung von Vollholz	412
3.4.4	Sortierung von Holz nach Tragfähigkeit	414
3.4.5	Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Eigenschaften und die Prüfung	418
3.4.5.1	Bestimmung der Rohdichte	418
3.4.5.2	Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes	419
3.4.6	Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Vollholz	419
3.4.6.1	Prüfung von Oberflächeneigenschaften	420
3.4.6.2	Prüfung rheologischer Eigenschaften	422
3.4.7	Prüfung von Holzwerkstoffen	423
3.4.7.1	Zerstörende Prüfungen	423
3.4.7.2	Produktionsüberwachung bei Holzwerkstoffen	425

Literaturverzeichnis	429
Weiterführende Literatur	430
Anhang	431
4 Holzvergütung	433
4.1 Holztrocknung	433
4.1.1 Gründe für die Holztrocknung	433
4.1.2 Wechselwirkung Umgebungsklima – Gleichgewichts- feuchte	434
4.1.3 Trocknungsvorgang, Feuchtegradient und Trock- nungsspannung	434
4.1.4 Der Trocknungsprozess – Systematik der Trock- nungsverfahren	440
4.1.5 Grundzüge zur Regelung des Trocknungsprozesses . .	450
4.1.6 Trocknungsqualität	451
Quellen und weiterführende Literatur	456
Normen	456
4.2 Holzschutz	457
4.2.1 Einleitung	457
4.2.2 Dauerhafte Holzanwendung	459
4.2.3 Integrierter Holzschutz	461
4.2.4 Holzschutzverfahren	464
4.2.4.1 Nichtdruckverfahren	464
4.2.4.2 Druckverfahren	466
4.2.5 Tränkbarkeit von Holzarten	467
4.2.6 Holzerstörung durch Pilze	470
4.2.6.1 Einteilung der Holzpilze	470
4.2.6.2 Feuchtebedarf	471
4.2.6.3 Fäuleformen	471
4.2.6.4 Hausfäulepilze	472
4.2.6.5 Holzverfärbende Organismen	473
4.2.7 Holzschädigende Insekten	475
4.2.8 Chemischer Holzschutz	476
4.3 Sonstige Vergütungsverfahren	485
4.3.1 Wirkungsprinzipien der Holzmodifizierung	485
4.3.2 Arten der Holzmodifizierung	489
4.3.2.1 Thermisch-physikalische Verfahren	489
4.3.2.2 Hydrophobierung mit Ölen und Wachsen . .	490
4.3.2.3 Chemische Modifizierung der Holzzellwand .	491
4.3.2.4 In der Zellwand polymerisierbare Chemi- kalien	494
4.3.2.5 Behandlung mit Siliziumverbindungen	496
4.3.2.6 Holz-Kunststoff-Komposite	496

Quellen und weiterführende Literatur	497
Normen	499
5 Holzzeugnisse	501
5.1 Möbel und Innenausbau	503
5.1.1 Möbel	503
5.1.1.1 Begriffe/Bezeichnungen	503
5.1.1.2 Bauteilzuordnungen	506
5.1.1.3 Systematisierung von Verbindungen	507
5.1.1.4 Konstruktionsdetails im Möbelbau	513
5.1.2 Innenausbau	524
5.1.2.1 Begriffe/Bezeichnungen	525
5.1.2.2 Allgemeines zu Schutzmaßnahmen im Innen- ausbau	527
5.1.2.3 Konstruktionen im Innenausbau	529
5.2 Bauelemente	533
5.2.1 Maß- und Modulordnung	534
5.2.2 Türen	536
5.2.2.1 Begriffe/Bezeichnungen	536
5.2.2.2 Konstruktionsdetails	538
5.2.3 Fenster	539
5.2.3.1 Begriffe/Bezeichnungen	539
5.2.3.2 Konstruktionsdetails	541
5.3 Sonstige Erzeugnisse aus Holz	543
Weiterführende Literatur	543
Sachwortverzeichnis	545

1 Roh- und Werkstoff Holz

1.1 Einführung

Der Baum als Holzproduzent

Der Baum ist eine langjährige, sich jährlich verlängernde, verdickende und verholzende höhere Pflanze, die kräftige Wurzeln und einen mehr oder weniger hohen Stamm ausbildet, wobei Holzgewächse erst ab 3 m Höhe zu den Bäumen zählen (unter 3 m sind es Sträucher). Der Baum als Holzpflanze gliedert sich in Erdstamm, Mittel- und Gipfelstück (= Zopfstück). Seine Ausbildung ist holzartenbedingt und wird stets von Baumalter, Bestandschluss und Standort bestimmt [2].

Zum Baumwachstum allgemein

Das Längen- bzw. Höhenwachstum erfolgt an den Zweig- und Wurzelspitzen, das Dickenwachstum am Stammumfang. Diese Vorgänge sind grundsätzlich auf Zellteilungen, -streckungen und -differenzierungen zurückzuführen.

Beim **Baumwachstum** wird das von den Wurzeln aufgenommene Wasser im Holzteil nach oben zu den Blättern/Nadeln geleitet. Dort werden mit Hilfe des CO_2 -Gehaltes der Luft und der Sonnenenergie die vorher im Wasser gelösten Bodensalze in organische Stoffe umgebildet (Assimilation) und in der Innenrinde wiederum nach unten geleitet. Neben diesen Auf- und Abwärtsströmen erfolgen auch ein Transport und eine Speicherung der umgewandelten Stoffe in horizontaler Richtung.

Der jährliche **Höhenzuwachs** ist zunächst gering, nimmt dann rasch zu und erreicht ein Maximum im Baumalter von 25 bis 40 Jahren; dies ist jedoch abhängig von Holzart, Standort und Gesundheitszustand. Unsere Nadelbäume Kiefer, Fichte, Tanne, Lärche erreichen Höhen bis zu 55 m, die Laubbäume Eiche, Esche, Birke, Linde und Ahorn z.B. Höhen von 35 bis 40 m. Die nordamerikanischen Mammutbäume und Redwoods können sogar über 100 m hoch werden, der australische Rieseneukalyptus fast 130 m!

Die maximalen **Brusthöhendurchmesser** der Bäume liegen überwiegend bei 1,0 m, so z.B. bei Kiefer, Fichte, Tanne, Lärche, Eiche, Edelkastanie, Esche, Nussbaum, Pappel, Rüster, Rotbuche, Weide; erheblich darunter liegen die Durchmesser bei Birke, Robinie, Erle, Kirschbaum, Weißbuche, Linde [2].

Zum Baumalter

Als **Höchstalter** (wenn keine äußeren Einflüsse vorliegen) sind bekannt geworden: etwa 1600 Jahre bei Stieleiche, etwa 1000 Jahre bei Fichte, Sommerlinde, Platane; etwa 750 Jahre bei Tanne, Zirbelkiefer, Edelkastanie, Rotbuche; etwa 600 Jahre bei Lärche, Winterlinde, Spitzahorn; etwa 500 Jahre bei Kiefer, Rüster, Silberpappel, Bergahorn; etwa 400 Jahre bei Kirschbaum und Nussbaum; etwa 300 Jahre bei Esche und Schwarzpappel; etwa 120 Jahre bei Weißbuche, Erle und Silberweide. Als **Durchschnittsalter** der Bäume wurden ermittelt: bis zu 500 Jahre bei Eiche; bis zu 300 Jahre bei Fichte und Rotbuche; bis zu 200 Jahre bei Kiefer und bis zu 150 Jahre bei Birke und Pappel. Das schlagreife Baumalter in bewirtschafteten Wäldern dürfte zwischen 20 und 120 Jahren liegen, z. B. 20 bei Pappel, Erle, Birke; 80 bei Rotbuche, Kiefer, Fichte; 120 bei Eiche [2].

Die Kenntnisse über die biologischen, insbesondere anatomischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften des Roh- und Werkstoffes Holz sind entscheidend für dessen Be- und Verarbeitung, aber auch für den Einsatz von Holzprodukten und Holzwerkstoffen im Möbelbau sowie Bauwesen.

1.2 Anatomie des Holzes

Rudi Wagenführ †
André Wagenführ

1.2.1 Holzstrukturuntersuchungen/Holzstrukturanalysen

1.2.1.1 Was ist Holz?

- **Biologisch gesehen:** ein durch Kambiumtätigkeit erzeugtes Dauergewebe
- **Makroskopisch gesehen:** ein aus verschiedenen Zellen zusammengesetztes Dauergewebe von Nadel- und Laubhölzern
- **Mikroskopisch gesehen:** die verholzte Zellwand von Nadelholz- und Laubholzzellen sowie die verschiedenen Zusammensetzungen, Anordnungen, Formen, Größen, Inhalte, Anteile und Typen dieser Zellen
- **Submikroskopisch gesehen:** die verholzte Zellwand speziell bezüglich Schichtenbau, Feinbau (Fibrillenverlauf) und Hohlräume

1.2.1.2 Holzanatomische Untersuchungsmethoden

Es wird zwischen einer Systematischen und Angewandten Holzanatomie unterschieden.

Bei der **Systematischen Holzanatomie** handelt es sich um eine strukturbeschreibende Anatomie der Holzarten, von der sich diagnostische Merkmale ableiten lassen. Diese wiederum sind für die Holzartenbestimmung notwendig.

Die **Angewandte Holzanatomie** steht mit naturwissenschaftlichen und technischen Fachgebieten in enger Verbindung, sodass schließlich zwischen einer physiologischen, pathologischen, ökologischen und technisch-technologischen Holzanatomie unterschieden werden kann.

Die **technisch-technologische Holzanatomie** wiederum vereint Strukturuntersuchungen und holztechnologische Grundlagen und berührt dabei auch Fragen der Holzchemie, Holzphysik, Holzvergütung, Holzbe- und -verarbeitung und des Holzarteneinsatzes. Im Vordergrund stehen dabei Strukturuntersuchungen an Holz und Holzwerkstoffen, insbesondere zur Beschreibung und Bestimmung von Holzarten im makroskopischen und mikroskopischen Bereich, aber auch von Holzfehlern und Holzschädigungen zur Ableitung bestimmter Holzeigenschaften. Dazu gehören auch mikrotechnologische Untersuchungen über das Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen in Verbindung mit anderen Materialien, z. B. Beschichtungs-, Kleb- und Vergütungsmaterialien, insbesondere im Grenzflächenbereich; letztlich ist auch das Verhalten der Holzstruktur bei extremer Belastung (z. B. durch Druck, Zug, Biegung u. a.) hier mit einzuordnen.

Natürlich muss der Holzanatom die **Holzmikrotechnologie** beherrschen, d. h., er sollte im makroskopischen, mikroskopischen und submikroskopischen Bereich arbeiten können. Er möchte Kenntnisse besitzen über die Holzbiologie allgemein und möglichst über entsprechende Arbeitshilfsmittel verfügen wie Mikrotom, Mikroskop, Spezialliteratur, Dateien, Sammlungen u. a., um die Teilgebiete der Mikrotomie, Mikroskopie, Mikrofotografie und elektronischen Bildverarbeitung zu überblicken.

Die Aufgaben des Holzanatomen erstrecken sich auf beratende und Forschungstätigkeit für Holzindustrie, Holzhandwerk, Holzhandel, z. B. beim Einsatz wenig bekannter Holzarten, bei Reklamationen, zur Qualitätssicherung, bei Produktionsschwierigkeiten, die holzartenbedingt auftreten können.

Der Einsatz ist sehr vielseitig, sei es in der Möbel-, Furnier-, Platten-, Bau-, Zellstoff-, Sportgeräte-, Musikinstrumenten-, Spielwaren- oder Verpackungsindustrie, sei es für Museen, Kunstsammlungen, Restauratoren, Archäologen. Stets steht die Untersuchung der Holzstruktur im Vordergrund.

Die Aufgabengebiete der Angewandten Holzanatomie sind Bild 1.1 zu entnehmen [1]; [2].

Mit der Holzanatomie in Verbindung stehende Fachgebiete – unter besonderer Berücksichtigung der Angewandten Holzanatomie

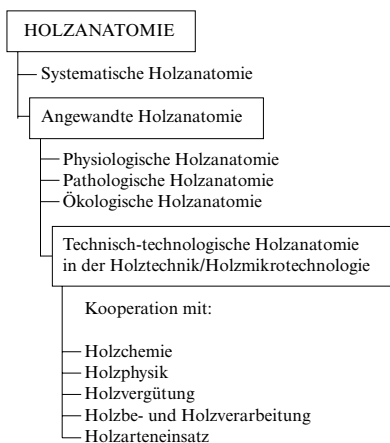


Bild 1.1: Aufgabengebiete der Angewandten Holzanatomie

1.2.1.3 Die wichtigsten Holzstrukturmerkmale

Strukturmerkmale im makroskopischen Bereich

Die makroskopische Beschreibung der Holzstruktur erfolgt mit bloßem Auge oder mit Hilfe einer schwachen Lupe. Sie dient sowohl der Ableitung verschiedener Holzeigenschaften als auch der Holzartenidentifizierung.

Bezüglich der drei Hauptfunktionen des Baumes wie Wasserleitung, Stoffspeicherung und Festigung werden auch drei **Hauptgewebe** unterschieden: das *Leitgewebe*, *Speichergewebe* und *Festigungsgewebe*. Daneben gibt es noch zwei **Nebengewebe** wie das *Sondergewebe* (z.B. Reaktionsholz) und das *Exkretgewebe* (z.B. Harzkanäle), die jedoch nicht immer vorkommen (Bild 1.2).

Aufbau, Anordnung, Größe und Form dieser Gewebe sind in den drei **Hauptschnittrichtungen** (Quer-, Tangential- und Radialschnitt) größtenteils gut erkennbar (Tabelle 1.1), zum Teil auch in den **Nebenschnittrichtungen** mit Übergang vom Tangential- zum Radialschnitt, also Halbtangential- bzw. Halbradialschnitt.

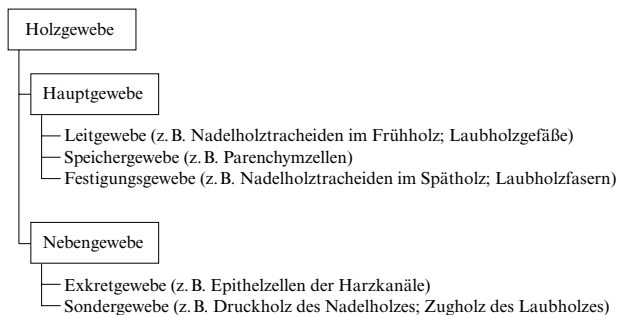


Bild 1.2: Gliederung der Holzgewebe [1]

Tabelle 1.1: Die Hauptschnittrichtungen (in Anlehnung an [1])

Hauptschnittrichtung	Kurzzeichen	Schnittführung
Querschnitt Synonym: Hirnschnitt	Q	quer zur Stammachse in Richtung der Holzstrahlen
Tangentialschnitt Synonym: Fladerschnitt	T	parallel zur Stammachse, quer zu den Holzstrahlen, tangential zu den Zuwachszonen
Radialschnitt Synonym: Spiegelschnitt	R	parallel zur Stammachse in Richtung der Holzstrahlen, senkrecht zu den Zuwachszonen

Eine räumliche Vorstellung vom Bau des Holzkörpers ist jedoch nur in den drei Hauptschnittrichtungen denkbar, wobei die beiden Längsschnitte das eigentliche Holzbild, die Textur des Holzes, ergeben.

Querschnittbetrachtung

Der *Querschnitt* erfolgt quer zur Faserrichtung bzw. Stammachse. Er wird auch als Hirnschnitt bezeichnet und ist zur besseren Kenntnis des anatomischen Baus des Holzkörpers von besonderer Bedeutung.

Am Stammquerschnitt eines berindeten Stammes sind von außen nach innen Rinde, Holzteil und Mark zu erkennen (Bild 1.3).

Die **Rinde** setzt sich aus der *Außenrinde* (= *Borke*) und der *Innenrinde* (= *Bast*) zusammen; Rindenstruktur und Rindendicke sind bei den einzelnen Baumarten unterschiedlich. Es wird zwischen *Früh-* und *Spätbast* unterschieden und bei der Borke zwischen *Ringel-* und *Schuppenborke*.

Insgesamt können fast 15 Rindentypen unterschieden werden.

Der **Holzteil** kann bei den meisten Holzarten einen mehr oder weniger auffallenden äußeren hellen *Splint* und inneren dunklen *Kern* aufweisen,



Bild 1.3: Stammquerschnitt von Lärche von außen nach innen: Rinde, Splintholz, Kernholz (Jahrringe deutlich)

weiterhin mehr oder weniger deutliche *Jahrringe* bzw. *Zuwachszonen*, *Holzstrahlen* und noch andere *Gewebe*, z.B. Längsparenchym und Harzkanäle.

Das **Mark** ist eine größtenteils in der Stammmitte befindliche *Markröhre*.

Zum Holzteil selbst:

■ Splintholz

Splintholz bzw. der *Splint* umgibt das Kernholz und ist dabei mehr oder weniger heller als das innere Holz. Es hebt sich insbesondere bei den Farbkernhölzern scharf ab. Die Splintbreite ist sehr unterschiedlich und von der Lage im Stamm, vom Baualter und -standort abhängig. Splintholz dient im lebenden Baum der Wasserleitung, enthält Reservestoffe wie Stärke, Zucker, Eiweißstoffe, ist daher weniger dauerhaft und wird oft von holzerstörenden Pilzen und Insekten befallen.

Splintholz enthält lebende Zellen, wobei der Übergang von lebenden zu toten Zellen zum Kernholz hin allmählich erfolgt.

■ Kernholz

Kernholz unterscheidet sich hinsichtlich seines Feuchtigkeitsgehaltes und seiner Färbung, sei es innerhalb des Stammquerschnittes oder der Baumarten. Es gibt Baum- bzw. Holzarten mit einem auffallenden *Farbkern* und solche mit einer *unauffälligen Kernholzausbildung*.

Bäume mit auffallendem Farbkern sind z.B. solche mit *obligatorischer Farbkernbildung* (z.B. Kernholzbäume wie Kiefer, Lärche, Douglasie,

Eiche, Robinie, Nussbaum, Schwarzpappel, Weide, Edelkastanie) und Bäume mit *fakultativer Farbkernbildung* (Baumarten mit einem meist unregelmäßig geformten *Falschkern*, z. B. Rotbuche, Esche, Erle, Birke, Ahorn).

Bäume mit unauffälligem Farbkern sind solche mit *hellem Kernholz* (sog. *Reifholzbäume*), z. B. Fichte, Tanne, Rotbuche, Linde. Das Kernholz ist vom umgebenden Splintholz farblich kaum unterscheidbar, es gibt jedoch Feuchteunterschiede zwischen Kern und Splint und solche mit *verzögertem Kernholz* (sog. *Splintholzbäume*), z. B. Ahorn, Birke, Erle, Weißbuche, Aspe. Verkernungsmerkmale sind hier nur mikroskopisch nachweisbar, es gibt keine Farb- oder Feuchteunterschiede zwischen Kern und Splint.

Eine Sonderstellung nehmen die *Kernreifholzbäume* ein, wo zwischen Farbkern und Splint ein meist schmaler Streifen intermediäres Holz zwischengelagert ist, z. B. bei Esche und Ruster.

Im Gegensatz zu Splintholz enthält Kernholz keine lebenden Zellen mehr. Die Verkernung infolge anatomisch-physiologischer Veränderungen (Stoffabscheidungen und Stoffumwandlung) beginnt bei entsprechender Splintbreite und ist auch von Standort und Klima abhängig. Wichtige Verkernungsvorgänge sind z. B. der Hoftüpfelverschluss bei den Nadelholztracheiden, die Thyllenbildung bei den Laubholzgefäßen, des Weiteren Stoffabscheidungen, -umwandlungen und -einlagerungen im Zellwandbereich.

Farbkernholz besitzt gegenüber Splintholz bessere physikalisch-mechanische Eigenschaften, ist trockener, schwerer, härter, dauerhafter und oft auch schwieriger imprägnierbar.

Die Farbskala des Kernholzes ist beachtlich und erstreckt sich bei den zahlreichen Holzarten von weißlich über gelblich, rötlich bis bräunlich mit Abweichungen bis schwärzlich, grünlich, orange u. a. Durch Ausbildung von Farbstreifen kann es zu einer Zweifarbigkeit kommen, z. B. bei Zebrano, Palisander, Makassar-Ebenholz.

Das Vorkommen von Farbkernen und die Holzfarbe selbst dienen mit als Holzarten-Bestimmungsmerkmal, wobei stets zu beachten ist, dass Farbänderungen möglich sind, sei es innerhalb der Holzart oder des Stammes selbst. Größere Abweichungen von der normalen Holzfarbe sind als Farbfehler zu werten.

■ Jahrringe/Jahresringe

Jahrringe sind jährliche, ringförmige, aus *Früh-* und *Spätholz* zusammengesetzte Zuwachsschichten des Baumes, daher auch die Bezeichnung *Zuwachszonen*. Jahrringe sind in ihrer Beschaffenheit sehr unterschiedlich und besonders deutlich sichtbar, wenn sich die zu Beginn und Ende der Vegetationsperiode ausgebildeten Holzzellen in ihrer Art, Größe, Anzahl

und Verteilung mehr oder weniger deutlich voneinander unterscheiden, so z.B. bei den Nadelhölzern wie Kiefer, Lärche, Douglasie und den ringporigen Laubhölzern wie Eiche, Esche, Ruster, Robinie und Edelkastanie, zum Teil auch bei den halbringporigen Laubhölzern wie Nussbaum und Kirschbaum. Jahrringe sind weniger deutlich sichtbar, wenn der strukturelle Wechsel zwischen Früh- und Spätholz allmählich erfolgt, wie bei Ahorn, Birke, Erle, Linde, Pappel, Rotbuche u. a.

- das *Frühholz* ist der zu Beginn der Vegetationszeit gebildete Teil des Jahrringes mit meist weitleumigen und dünnwandigen Zellelementen, die anfangs auch der Wasserleitung dienen, bei Nadelhölzern u. a. der hellere, lockere, weichere Teil (Bild 1.4).
- das *Spätholz* ist der gegen Ende der Vegetationsperiode gebildete Teil des Jahrringes mit meist englumigen und dickwandigen Zellelementen, vorwiegend der Festigung dienend, bei den Nadelhölzern u. a. der dunklere, feste Teil. Spätholz hat gegenüber dem Frühholz eine höhere Rohdichte, Quellung und Schwindung.

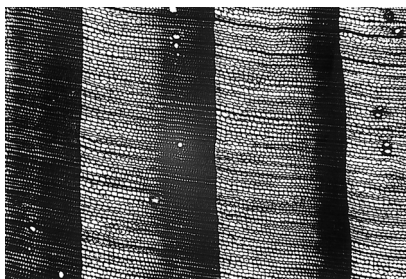


Bild 1.4: Querschnitt von Lärche Durchlicht; M 5 : 1; Jahrringe mit hellem Frühholz und dunklerem Spätholz (einschl. Harzkanäle), Jahrringgrenze deutlich

Zuwachszonen werden auch bei den Baumarten der tropischen und subtropischen Klimazonen ausgebildet, wo Trockenzeiten und Regenzeiten innerhalb eines Jahres einander abwechseln. Diese sog. Vegetationszonen können nicht den Jahrringen mit Früh- und Spätholz gleichgesetzt werden! Es gibt auch immergrüne Tropenholzarten, deren Wachstum nicht in Zuwachszonen ablesbar wird, z. B. verschiedene Ebenholzarten.

Die *Jahrringbreite* als radiale Ausdehnung des Jahrringes mit Früh- und Spätholzanteilen ist abhängig von Holzart, Boden, Klima, Baumalter und äußerlichen Schädigungen; sie verändert sich normalerweise ebenso wie die Früh- und Spätholzbreite von Ring zu Ring. Holz mit breiten Jahrringen wird als *grobringig*, solches mit schmalen Jahrringen als *feinringig* bezeichnet. Jahrringbreiten geben Auskunft über das Baumwachstum allgemein, aber auch über die möglichen physikalisch-mechanischen und technologischen Eigenschaften.

Mit der gesamten Jahrringanalyse befasst sich ein gesonderter Wissenschaftszweig, die *Jahrringchronologie* bzw. *Dendrochronologie*.

Der Übergang vom Früh- zum Spätholz innerhalb des Jahrringes wird übrigens bei den Nadelhölzern mit als Bestimmungsmerkmal gewertet. Als *Jahrringgrenze* ist stets die Grenzlinie zwischen dem Spätholz des einen und dem Frühholz des anderen Jahrringes anzusehen, sie kann mehr oder weniger deutlich in Erscheinung treten.

Porigkeit der Laubhölzer

Tabelle 1.2: Porigkeit einheimischer Laubhölzer [1]

Porengruppe	Frühholzgefäße Anordnung	Spätholzgefäße Anordnung	Beispielholzarten
ringporig	zu einem Ring (ein oder mehrere); weitlumig	radial, diagonal, tangential, zerstreut, nestförmig; englumig	Eiche, Esche, Ruster, Robinie
halbringporig	reichlicher als im Spätholz	spärlicher als im Frühholz	Kirschbaum
	Durchmesser zum Spätholz hin abnehmend	Durchmesser geringer als im Frühholz	Nussbaum
zerstreutporig	fast gleich große Gefäße über den gesamten Jahrring verteilt		Ahorn, Birke, Erle, Pappel, Rotbuche, Linde, Birnbaum, Weißbuche

Die Anordnung und Größe der über das Früh- und Spätholz verteilten angeschnittenen Gefäße ergeben auf dem Querschnitt drei wichtige Porengruppen:

Ringporige Laubhölzer

Hierbei sind die weitlumigen Frühholzgefäße zu einem Ring angeordnet und bilden einen deutlichen Übergang zu den anschließenden englumigen Spätholzgefäßen.

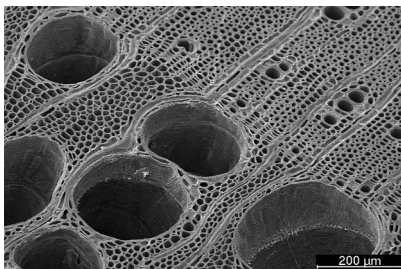


Bild 1.5: Querschnitt von Esche; ringporige Gefäßanordnung im Frühholzbereich; (REM-Aufnahme; Quelle: E. Bäucker, Dresden)

Halbringporige Laubhölzer

Sie können zwei Varianten aufweisen: Entweder nehmen die Gefäßdurchmesser vom Früh- zum Spätholz allmählich ab oder die fast gleich großen Gefäße sind im Frühholzbereich angehäuft.

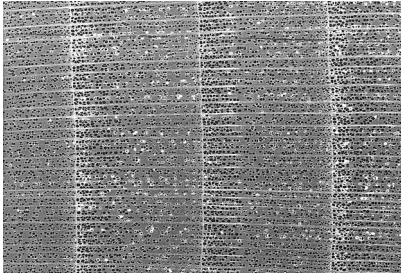


Bild 1.6: Querschnitt von Kirschbaum; M 5 : 1; halbringporige Gefäßanordnung mit etwas höherer Gefäßanhäufung im Frühholzbereich

Zerstreutporige Laubhölzer

Sie haben fast gleich große Gefäße und sind über den gesamten Jahrring ziemlich gleichmäßig verteilt.

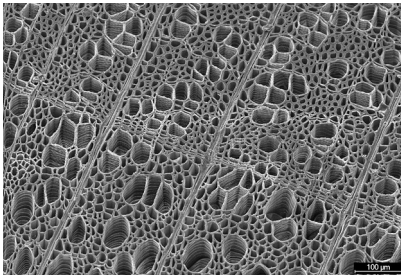


Bild 1.7: Querschnitt von Linde; zerstreutporige Gefäßanordnung (REM-Aufnahme; Quelle: E. Bäucker, Dresden)

Die Porigkeit ist mit ein wichtiges Bestimmungsmerkmal der Holzarten.

Holzstrahlen

Holzstrahlen (Synonym „Markstrahlen“) sind auf dem Querschnitt als feine, hellere, radial verlaufende Linien zu erkennen, makroskopisch jedoch nur ab einer bestimmten Größe, z. B. bei Eiche, Rotbuche, Platane (Bild 1.8).

Eine Anhäufung von sehr schmalen Holzstrahlen führt weiterhin zur Ausbildung von großen *Scheinholzstrahlen*. Diese sind schwieriger zu erkennen und z. B. bei der Erle und Weißbuche anzutreffen. Große Holzstrahlen beeinflussen die Holzfestigkeit und dienen mit als Bestimmungsmerkmal.

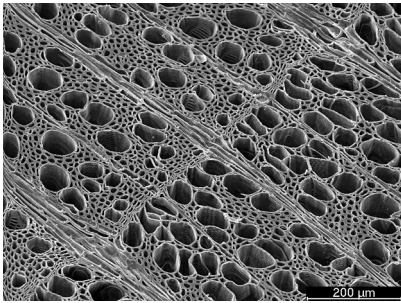


Bild 1.8: Querschnitt von Platane (REM-Aufnahme); zerstreutporig, Holzstrahlen auffallend breit (Quelle: E. Bäucker, Dresden)

Längsparenchym

ist meist ein helleres *Axialparenchym* mit unterschiedlichen Anordnungsformen. Bei einer feldartigen oder bandförmigen Anordnung ist es insbesondere bei tropischen Laubhölzern auf dem Querschnitt gut erkennbar (Bilder 1.9 und 1.10). Es ist nicht bei allen Holzarten anzutreffen. Bei unseren einheimischen Laubholzarten Eiche, Esche, Rüter und Nussbaum ist es mehr oder weniger gut unter der Lupe wahrnehmbar, bei den Nadelhölzern kommt Längsparenchym seltener vor und ist makroskopisch nicht erkennbar. Die Anordnungsformen dienen mit als Bestimmungsmerkmal.

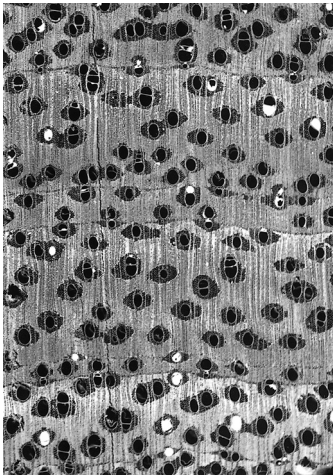


Bild 1.9: Querschnitt von Doussié; M 5 : 1; Längsparenchymanordnung augenförmig

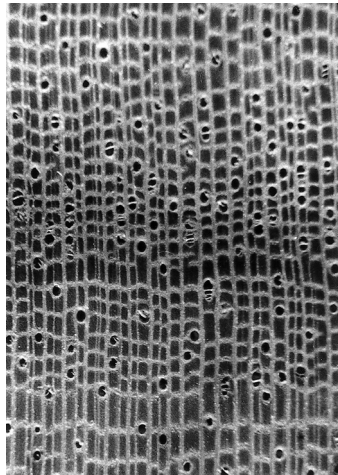


Bild 1.10: Querschnitt von Koto; M 5 : 1; Längsparenchymanordnung bandförmig

Harzkanäle

Harzkanäle erscheinen im Querschnitt als helle oder dunkle Punkte überwiegend im Spätholz einiger Nadelhölzer, so z. B. bei Kiefer, Fichte, Lärche oder Douglasie. Sie sind jedoch auch bei einigen tropischen Laubhölzern anzutreffen (z. B. bei Meranti, Yang, Merawan, Mersawa). Die Harzkanäle der Nadelhölzer sind von parenchymatischen Zellen, den sog. Epithelzellen, ausgekleidet. Es handelt sich um schizogen entstandene harzbildende Zellen, die das Harz unter Druck in den Harzkanal abgeben. Harzkanäle beeinflussen mit die Bearbeitung des Holzes, ihr Vorhandensein gilt auch als Bestimmungsmerkmal; Tanne und Eibe haben z. B. keine Harzkanäle!

Längsschnittbetrachtung – die Holztextur

Während die Querschnittbetrachtung insbesondere Auskunft über die Holzstruktur, über Baumtyp und Holzart gibt, kann mit der *Längsschnittbetrachtung* das eigentliche *Holzbild*, die *Holztextur*, erkannt werden. Die Holztextur ist letztendlich mit ausschlaggebend für den Holzarteneinsatz.

Die Textur des Holzes ist vor allem von Aufbau, Anordnung, Form und Größe der verschiedenen Holzgewebe abhängig und in diesem Zusammenhang von der jeweiligen Schnittrichtung, wie Tangentialschnitt, Radialschnitt, Halbradial- bzw. Halbtangentialschnitt, hinzu kommen neben der Holzfarbe noch Strukturabweichungen und Strukturschädigungen, die die Textur beeinflussen. Je nachdem, wie die Jahrringe, Zuwachszonen, Holzstrahlen, Längsparenchymbänder, Farbbänder, Faserabweichungen u. a. angeschnitten wurden, unterscheidet man je nach Erscheinungsbild verschiedene Texturbegriffe, die sich wiederum in sehr dekorative, wenig dekorative oder schlichte Texturen unterteilen lassen.

Folgende Texturbegriffe sind üblich (Tabelle 1.3) (Bild 1.11 a–j): schlicht, gefladert, gestreift, gespiegelt, gefeldert, geriegelt, geflammt, gemasert, geaugt, Pommelé-, Drapé- und Pyramidentextur.

Tabelle 1.3: Texturbegriffe (in Anlehnung an [1])

Texturbegriff	Erscheinungsform	Hauptschnitt-richtung	Beispielholzarten
schlicht	einheitliche Zeichnung	R, T	Ahorn, Birke, Erle, Birnbaum, Linde, Pappel, Rotbuche
gefladert	Frühholz-Spätholz-Kontraste	T	Nadelhölzer, ringporige Laubhölzer
	Farbstreifen, Längsparenchymbänder	T	Palisander, Wengé
	nur Längsparenchymbänder	T	Sipo
gestreift	Frühholz-Spätholz-Kontraste	R	Nadelhölzer, ringporige Laubhölzer
	Farbstreifen, Längsparenchymbänder	R	Palisander, Rosenholz, Wengé
	Wechseldrehwuchs	R	Sapelli, Sipo
gespiegelt/ gebändert	Holzstrahlbänder	R	Eiche, Platane, Rotbuche
gefeldert	Wechseldrehwuchs + unregelmäßiger Faserverlauf	R	Makoré, Afrik. Mahagoni
geriegelt/ gewellt/ moiré	tangentiale Faserabweichungen	R	Ahorn, Makoré, Avodiré
geflammt	gerader Faserverlauf + tangentiale Faserabweichungen	R	Birke, Avodiré
Pyramidentextur	Y-förmige Zeichnung im Bereich von Stamm- oder Astgabeln	R, T	Nussbaum, Birnbaum
gemasert	unregelmäßiger wirbeliger bis kreisförmiger Faserverlauf bei Maserknollen und Wurzelstücken	T	Esche, Rüster, Pappel, Ahorn, Nussbaum, Eiche
geaugt	augenförmige Zeichnung durch angeschnittene Feinäste	T	Zuckerahorn
Pommelé	muschelförmige, blumige oder geperlte Zeichnung	T	Sapelli, Bossé
Drapé	radial gewellt Faserverlauf; schräg verlaufende Zeichnung (durch Schlingpflanzen verursacht)	T	Nussbaum, Sapelli
gehaselt	durch längsradialen Wimmerwuchs der Jahrringe gefladerte bis gefelderte Zeichnung	T	Japanische Esche

Hinweis: Viele Texturen erscheinen durch zusätzlichen Wechseldrehwuchs und unterschiedliche Lichtreflexion besonders dekorativ. T = Tangentialschnitt, R = Radialschnitt

Die Furnierindustrie wendet beim Herstellen von Messer- und Schäl-furnieren verschiedene Zurichtungsmethoden an, die Grundlage dieser Texturbilder sind.



Bild 1.11a: Gefladerte Textur
Lärche (T)

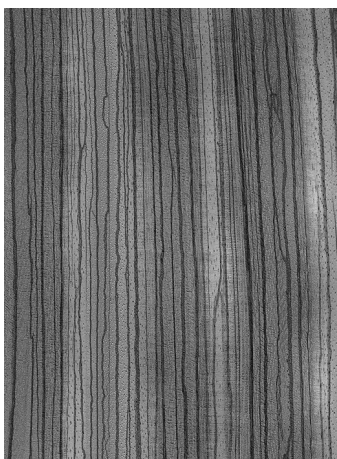


Bild 1.11b: Gestreifte Textur
Zingana (R)

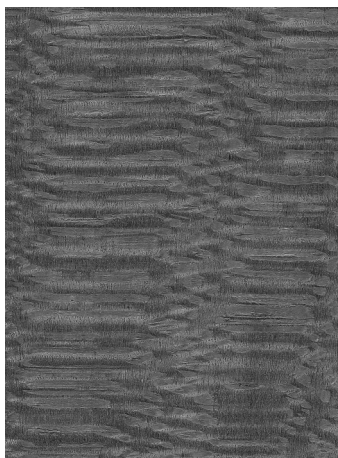


Bild 1.11c: Gespiegelte Textur
Silky oak (R)

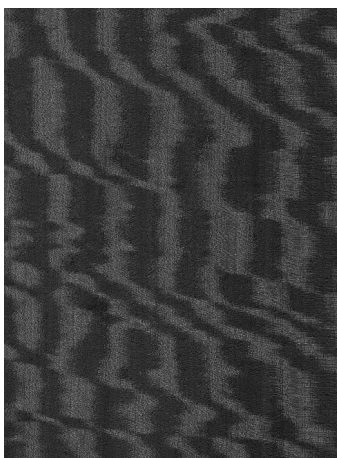


Bild 1.11d: Gefelderte Textur
Makoré (R)

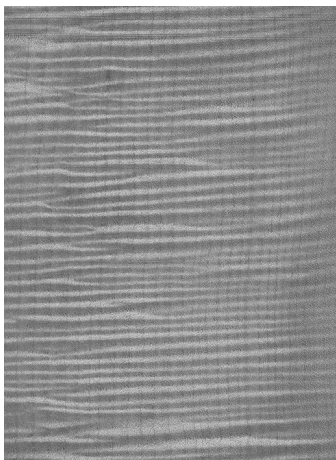


Bild 1.11e: Geriegelte/gewellte Textur
Ahorn (R)

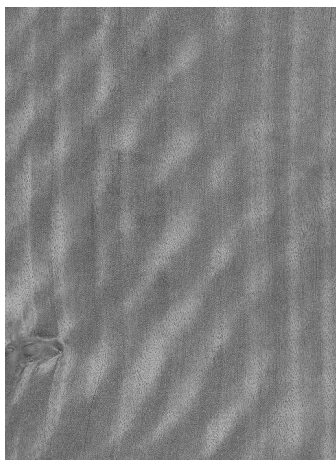


Bild 1.11f: Geflamnte Textur
Avodiré (T)

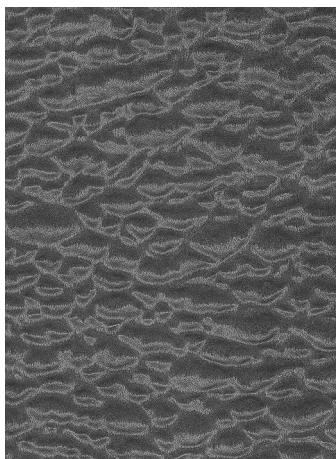


Bild 1.11g: Pommelé-Textur
Sapelli (T)



Bild 1.11h: Gemaserte Textur
Thuya (R)

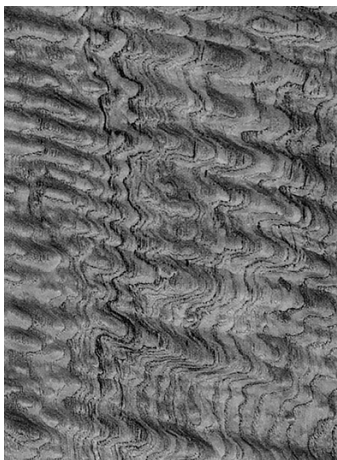


Bild 1.11i: Gehaselte Textur
Tamo (T)



Bild 1.11j: Pyramiden-Textur
Nussbaum (R)

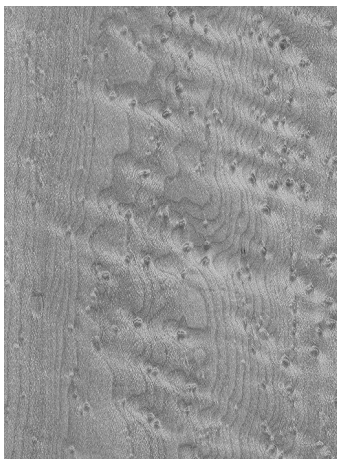


Bild 1.11k: Geaugte Textur
Vogelaugenahorn (T)



Bild 1.11l: Drapé-Textur
Nussbaum (T)

Besonderheiten des Holzkörpers

Hierzu zählen der Glanz, die Farbe und der Geruch des Holzes.

Der natürliche **Glanz** des Holzes ist im Radialschnitt bei längs angeschnittenen großen Holzstrahlen besonders auffallend, so bei Ahorn, Eiche, Rotbuche, Platane; er kann durch einen abweichenden Faserverlauf infolge Lichtreflexion noch verstärkt werden.

Die natürliche **Farbe** des Holzes kann sich nach dem Fällen des Baumes, nach dem Einschnitt des Holzes und nach seiner Verarbeitung durch Einwirkung von Licht, Wärme und Witterungseinflüssen auffallend verändern. Krasse Farbänderungen können z.B. bei der Robinie durch direkte Lichteinwirkung eintreten (von grünlich in bräunlich!).

Der **Geruch** des Holzes ist entweder nur beim frischen Holz wahrnehmbar oder auch noch in getrocknetem Zustand. Aromatisch riecht z.B. das Holz von Cedro oder Sapelli, kampferartig das des Kampferbaums; es gibt auch unangenehme Gerüche durch Gerbstoffeinlagerung. Stark riechende Hölzer schränken den Verwendungszweck ein [1].

Strukturmerkmale im mikroskopischen Bereich

Die mikroskopische Beschreibung der Holzstruktur erfolgt in den bekannten drei Schnittrichtungen: Quer-, Tangential- und Radialschnitt, mitunter auch am *mazierten* Material, indem kleine Holzsplitter durch Zugabe von Chemikalien in Einzelzellen zerlegt werden. Voraussetzungen derartiger Untersuchungen sind Kenntnisse über die Holzmikrotechnologie, d.h. über die Mikrotomie und Mikroskopie, also die Präpariertechnik und Mikroskopiertechnik, um überhaupt Strukturanalysen anfertigen zu können.

Nadelholzstruktur

Das im Verhältnis zum Laubholz entwicklungsgeschichtlich ältere Nadelholz hat einen verhältnismäßig einfachen und regelmäßigen Aufbau. Nur zwei Zelltypen bilden das Nadelholzgewebe: *Tracheiden* und *Parenchymzellen* (Bild 1.12). Über Anordnung, Form und Funktion siehe Tabelle 1.4.

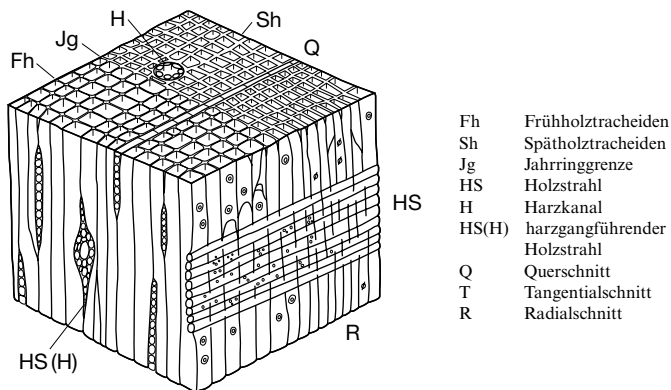


Bild 1.12: Nadelholzwürfel, schematisch [2]

Tabelle 1.4: Anordnung, Form und Funktion der Nadelholzzellen [1]; [2]

Zelltyp	Anordnung	Form	Funktion
Frühholztracheiden	axial	langgestreckt	Wasserleitung
Spätholztracheiden	axial	langgestreckt	Festigung
Holzstrahltracheiden	radial	langgestreckt	Wasserleitung
Holzstrahlparenchym	radial	prismatisch	Speicherung
Längsparenchym	axial	prismatisch	Speicherung
Epithelzellen der Harzkanäle	axial/radial	rundlich bis oval	Harzausscheidung

ständig vorkommend: Frühholztracheiden, Spätholztracheiden, Holzstrahlparenchym

Tracheiden

Längstracheiden: sind axial verlaufende, tote, 3000 bis 5000 mm lange Holzzellen und bilden zu 90 bis 95 % den gesamten Nadelholzkörper. Sie sind auf dem Querschnitt in radialen Reihen ausgerichtet, wobei die radialen Durchmesser vom Früh- zum Spätholz hin abnehmen, während die tangentialen Durchmesser fast gleich bleiben; die Zellwanddicken nehmen dabei vom Früh- zum Spätholz hin zu, und diese Übergänge können innerhalb eines Jahrringes und an der Jahringgrenze deutlich oder weniger deutlich sein (Bild 1.13). Die Form der Tracheiden im Querschnitt ist vier- bis sechseckig. In den Radialwänden befinden sich sog. *Hoftüpfel* als Durchbrechungen und Verbindungselemente zu den benachbarten Tracheiden (Bild 1.14), sie dienen dem radialen Flüssigkeitsaustausch.

Die Längstracheiden werden unterteilt in Frühholz- und Spätholztracheiden. *Frühholztracheiden* sind dünnwandig, weitleumig, haben abgerundete Enden und große Hoftüpfel in den Radialwänden. *Spätholztracheiden* sind dickwandig, englumig, haben zugespitzte Enden und kleine Hoftüpfel in den Radialwänden.

Quertracheiden: sind radial verlaufende Holzstrahltracheiden, die in Verbindung mit Holzstrahlparenchymzellen bei Nadelhölzern die *heterozellularen Holzstrahlen* bilden, z. B. bei Kiefer, Fichte, Lärche, Douglasie; Vorkommen dient mit als Bestimmungsmerkmal.

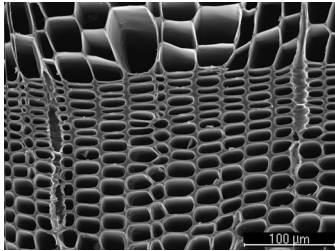


Bild 1.13: Querschnitt von Fichte (REM-Aufnahme); zunehmende Zellwanddicken der Längstracheiden vom Früh- zum Spätholz bei deutlicher Jahrringgrenze (Quelle: E. Bäucker, Dresden)

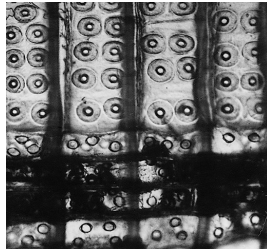


Bild 1.14: Radialschnitt von Redwood; M 175 : 1; paarig angeordnete Hoftüpfel in den Längstracheiden

Sonderformen:

Zu den Sonderformen zählen Druckholztracheiden und Zellwandverdickungen.

Druckholztracheiden sind Bestandteil des Druckholzes (siehe Abschn. 1.2.1.4) und haben als dickwandige Längstracheiden im Querschnitt eine rundliche Form, bilden dadurch Interzellulare und fallen im Längsschnitt durch ein schraubenförmiges Spaltensystem auf.

Zellwandverdickungen bei Tracheiden können schraubig (Bild 1.15), stäbchenförmig oder auch gezähnt sein und dienen mit als Bestimmungsmerkmal.

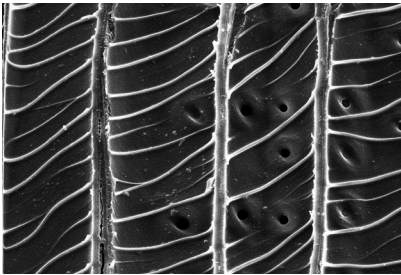


Bild 1.15: Radialschnitt von Eibe (REM-Aufnahme); schraubenförmige Zellwandverdickungen (Quelle: E. Bäucker, Dresden)

Parenchymzellen

Holzstrahlparenchymzellen durchziehen den Holzkörper als schmale radiale Bändchen und bilden den eigentlichen Holzstrahl. Diese Holzstrahlen können nur einschichtig oder bei Vorhandensein von Harzkanälen in der Mitte auch mehrschichtig sein. Sie können hoch oder niedrig, homozellular (nur aus Parenchymzellen bestehend) oder heterozellular (aus Parenchymzellen und Quertracheiden bestehend) zusammengesetzt sein.

Längsparenchymzellen sind strangartig zusammengesetzt, mit dunklen Inhaltsstoffen versehen und nicht bei allen Nadelhölzern anzutreffen.

Epithelzellen sind dünn- oder dickwandige parenchymatische Zellen, die längs- und querverlaufende Harzkanäle auskleiden, soweit Harzkanäle vorkommen (Bild 1.16).

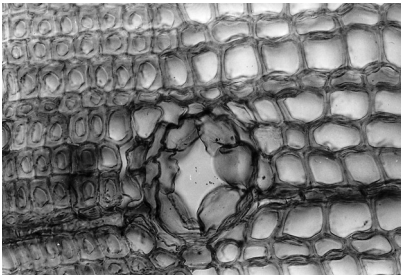


Bild 1.16: Querschnitt von Kiefer; dünnwandige Epithelzellen im Harzkanal; M 175 : 1

Laubholzstruktur

Das entwicklungsgeschichtlich jüngere Laubholz hat gegenüber dem Nadelholz einen komplizierteren Aufbau. So sind *Gefäße* und *Librifasern* neben den Parenchymzellen und den seltener vorkommenden Tracheiden anzutreffen (Bild 1.17). Über Anordnung, Form und Funktion siehe Tabelle 1.5.

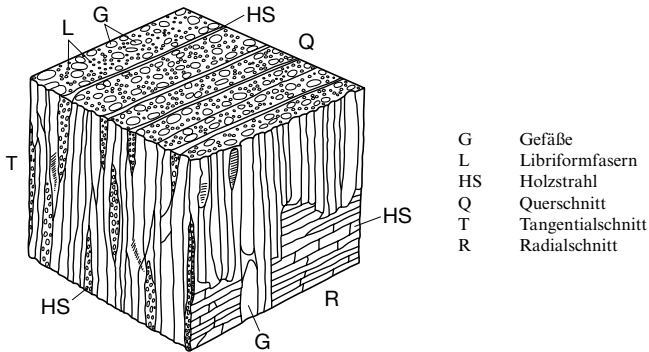


Bild 1.17: Laubholzwürfel, schematisch [2]

Tabelle 1.5: Anordnung, Form und Funktion der Laubholzzellen (einheimische Holzarten) [1]; [2]

Zelltyp	Anordnung	Form	Funktion
Gefäße/Tracheen	axial	langgestreckt	Wasserleitung
Libriformfasern	axial	langgestreckt	Festigung
Tracheiden in Gefäßnähe	axial	langgestreckt	Wasserleitung
Fasertracheiden	axial	langgestreckt	Festigung
Holzstrahlparenchym	radial	prismatisch	Speicherung
Längsparenchym	axial	prismatisch	Speicherung

ständig vorkommend: Gefäße, Holzstrahlparenchym
 überwiegend vorkommend: Libriformfasern, Fasertracheiden
 seltener vorkommend: Gefäßtracheiden, vasizentrische Tracheiden

Gefäße

Gefäße werden auch als *Tracheen* bezeichnet. Sie entstehen durch Verschmelzung axial gerichteter Gefäßglieder und werden durch ihre seitlichen und axialen Durchbrechungen, ihre Form, Größe, Häufigkeit, Anordnung, Wanddicke, Wandverdickung, ihren Inhalt und Anteil charakterisiert. Die seitlichen Durchbrechungen werden durch Hoftüpfel, die axialen als überwiegend einfache, seltener als leiterförmige Durchbrechungen charakterisiert. Über die Gefäßanordnung im Querschnitt (= Porigkeit) wurde bereits im Abschnitt „Porigkeit der Laubhölzer“ hingewiesen. Die Form kann rundlich, oval oder eckig sein, die Größe sehr klein ($< 50 \mu\text{m}$) bis sehr groß ($> 200 \mu\text{m}$), die Häufigkeit sehr gering (etwa $2/\text{mm}^2$) bis sehr hoch (etwa $70/\text{mm}^2$). Die Gefäßwanddicken betragen durchschnittlich $3 \dots 5 \mu\text{m}$ und als Gefäßwandverdickungen

können holzartenspezifische spiralförmige Verdickungen auftreten. Die Gefäßinhalte können als Kernstoffablagerungen organischer oder anorganischer Natur sein, z. B. Harze, Öle, Gerbstoffe, Farbstoffe, Calciumoxalat, Calciumcarbonat, Kieselsäure u. a., sie können aber auch struktureller Natur sein, indem z. B. *Thyllen* ausgebildet werden. Thyllen sind Auswüchse von vorwiegend Holzstrahlparenchymzellen durch die Tüpfelhohlräume benachbarter Gefäßzellen in das Zelllumen des Gefäßes. Sie sind u. a. anzutreffen bei Robinie (Bild 1.18), Rüster, Edelkastanie und Eiche. Die Form und Größe der Thyllen sind unterschiedlich, sie können dünn- oder dickwandig sein. Gefäßinhalte führen größtenteils zu reduzierten Holzeigenschaften wie Trocknung, Imprägnierung und Bearbeitung.

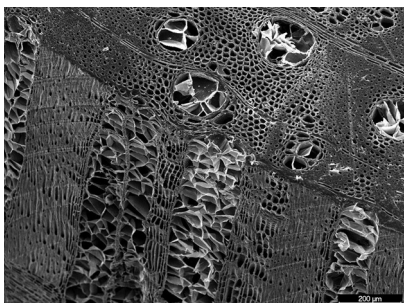


Bild 1.18: Quer-/Längsschnitt von Robinie (REM-Aufnahme); Thyllen in den Frühholzgefäßen (Quelle: E. Bäucker, Dresden)

Fasern

Die der Festigung dienenden Fasern werden durch ihren Typ und Anteil, durch Anordnung, Form, Wanddicke, Wandverdickung und Länge charakterisiert. Weiterhin sind bestimmte Sonderformen zu beachten.

Zwei Fasertypen werden unterschieden: die eigentlichen *Holzfasern*, als *Libriformfasern* bezeichnet, und die sog. *Fasertracheiden*, die nicht bei allen Holzarten auftreten.

Der Faseranteil liegt bei den meisten Holzarten bei 50 bis 60%. Die Faserform auf dem Querschnitt ist überwiegend polygonal. Die Faserwanddicken können dünn- bis dickwandig sein (Faserlumen entspricht der doppelten Faserwanddicke), aber auch extrem dünn- oder dickwandig und sind für die technologische Bewertung der Holzart von Bedeutung. Die Faseranordnung auf dem Querschnitt ist entweder unregelmäßig oder radial. Die Faserlängen betragen durchschnittlich 1000 bis 1500 µm, sind also kürzer als die Nadelholztracheiden. Als Sonderformen gelten sog. *gelatinöse Fasern* (= *Zugholzfasern*) (s. Abschn. „Strukturveränderungen“) und *gekammerte Fasern*.

Tracheiden

Sie treten als sog. *Gefäßtracheiden* (z. B. die Gefäße begleitend bei Rotbuche und Birke) oder *vasizentrische Tracheiden* (z. B. in der Nähe der Gefäße bei Eiche und Edelkastanie) auf und sind kürzer als die Fasern.

Parenchymzellen (Holzstrahl-, Längsparenchymzellen)

Die *Holzstrahlparenchymzellen* durchziehen als radial gerichtete und bandartig angehäuften Zellen den Holzkörper in Form eines *Holzstrahls*, ähnlich wie bei den Nadelhölzern. Allerdings ist ihre Klassifizierung erweitert, indem sie nach ihrer Zusammensetzung, Anordnung, Form, Häufigkeit, Größe und ihren Inhaltsstoffen charakterisiert werden. Holzstrahlen können homogen (nur aus gleich geformten Parenchymzellen bestehend) oder heterogen (aus verschiedenen geformten Parenchymzellen bestehend) zusammengesetzt sein. Sie können als echte oder sog. Scheinholzstrahlen (z. B. bei Erle, Weißbuche) auftreten (s. Abschn. „Strukturveränderungen“). Sie können im Tangentialschnitt unregelmäßig oder stockwerkartig (z. B. Palisander) angeordnet sein und dabei eine überwiegend spindelförmige Form aufweisen. Die Häufigkeit (= Dichte) ist sehr unterschiedlich von etwa 4/mm bis über 16/mm. Die Breite kann ein- und/oder mehrschichtig sein bzw. $< 15 \mu\text{m}$ bis $> 100 \mu\text{m}$, die Höhe liegt im Durchschnitt bei 300 bis $500 \mu\text{m}$. Als Zellinhaltsstoffe können Kristall- und Siliciumeinlagerungen, Kernstoffe oder etherische Öle auftreten. Einige wichtige Merkmale sind Bild 1.19 zu entnehmen.

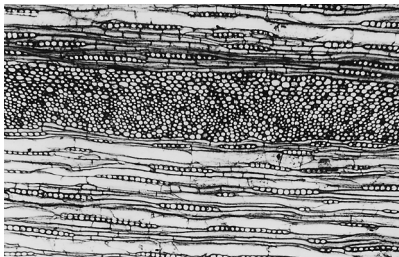


Bild 1.19: Tangentialschnitt von Eiche; Holzstrahlen in zwei verschiedenen Größen; ein- und mehrschichtig; M 30 : 1

Die *Längsparenchymzellen* sind bei Laubhölzern reichlicher anzutreffen als bei Nadelhölzern. Sie können jedoch auch fehlen. Als axial ausgerichtete faserförmige Zellen oder strangbildende Zellen können auf dem Querschnitt verschiedene Anordnungsformen unterschieden werden, so das *apotraceale Längsparenchym* ohne Kontakt zu den Gefäßen, das *paratracheale Längsparenchym* mit den Gefäßen in Verbindung stehend, und das *gebänderte Längsparenchym*, ohne oder mit den Gefäßen in Verbindung stehend (Bild 1.20). Auch in diesen Zellen können Inhaltsstoffe wie Kernstoffe, Kristalle, Silicium, Öle auftreten.

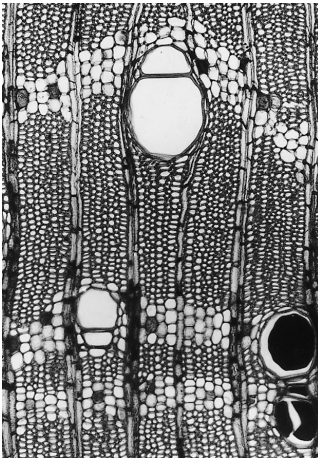


Bild 1.20: Querschnitt von Sipo;
paratracheal-bandförmig angeordnetes
Längsparenchym mit Gefäßkontakten; M 40 : 1

Besonderheiten der Mikrostruktur

Hierzu zählen die sog. *Tüpfel* der Zellwand und ihre Anordnungsformen, weiterhin die *Interzellulargänge* und verschiedenartige *Einschlüsse*.

Tüpfel sind Öffnungen der Zellwand und bestehen aus *Tüpfelmembran* und *Tüpfelhohlraum*. Die Tüpfelmembran ist bei den Nadelhölzern in der Mitte zu einem runden *Torus* verdickt, er wird von einer porigen *Margo* umgeben. Der Tüpfelhohlraum endet als *Tüpfelmündung* (= *Porus*). Zwei Tüpfelgrundtypen werden unterschieden: *Hoftüpfel* und *einfache Tüpfel*. Hoftüpfel sind in Nadelholztracheiden (Bild 1.14) und Laubholzgefäßen anzutreffen, einfache Tüpfel bei Libriformfasern und parenchymatischen Zellen. Hinsichtlich der Tüpfelung wird unterschieden zwischen der *Kreuzungsfeldtüpfelung* der Nadelhölzer (= Verbindung Tracheide/Holzstrahl), der Laubhölzer (= Verbindung Gefäß/Holzstrahl) und der reinen *Gefäßtüpfelung* (= Verbindung Gefäß/Gefäß).

Interzellulargänge sind axial und/oder radial verlaufende Kanäle, die oft mit dünn- oder dickwandigen parenchymatischen Epithelzellen ausgekleidet sind. Sie enthalten Harze, etherische Öle, Gummi u. a. Stoffe. Sie können obligatorisch oder fakultativ auftreten, so bei bestimmten Nadelhölzern, aber auch bei einigen tropischen Laubnutzhölzern.

Mineralische Einschlüsse treten als Kristalle in verschiedenen Formen, Größen und Zellen auf, es handelt sich dabei um Carbonate, Phosphate, Silikate, Sulfate und Oxalate. Sie beeinflussen größtenteils die Bearbeitbarkeit des Holzes [1]; [2].

Strukturmerkmale im submikroskopischen Bereich

Die Zellwand einer Holzzelle setzt sich aus verschiedenen Schichten oder Lamellen zusammen, die wiederum eine Vereinigung von *Cellulosefibrillen*, *Hemicellulose* und *Lignin* darstellen. Die Anteile dieser Bestandteile in den verschiedenen Schichten der Zellwand sind sehr unterschiedlich. Die langen Cellulosekettenmoleküle verbinden sich zu sogenannten Fibrillen mit teilkristalliner Struktur und sind für die Längszugfestigkeit zuständig. Diese Fibrillen sind wiederum in einer Ligninmatrix eingebettet, die als ziemlich druckfest gilt. Die Hemicellulose hat schließlich die Aufgabe, die Cellulosefibrillen mit der Ligninmatrix zu verbinden. Unter dem Mikroskop, am günstigsten unter dem Rasterelektronenmikroskop, sind die einzelnen Zellwandschichten und deren Struktur gut erkennbar (Bild 1.21).

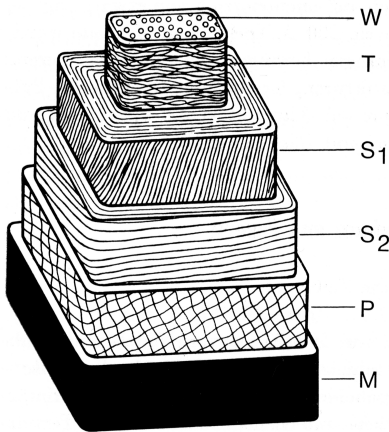


Bild 1.21: Zellwandmodell nach Liese (in [51])
M Mittellamelle; P Primärwand;
S1 äußere Sekundärwand; S2 zentrale
Sekundärwand; T Tertiärwand/innere
Sekundärwand; W Warzenschicht

Folgende Schichten sind von außen nach innen unterscheidbar:

- die *Mittellamelle* (CML)
verbindet die angrenzenden Zellen miteinander, besteht aus Pektin und Lignin und wird daher auch als Kittsubstanz bezeichnet. Mit der anschließenden Primärwand wird sie zur sog. „Mittelschicht“ zusammengefasst
- die *Primärwand* (P)
als dünne Schicht mit zerstreuter Fibrillenorientierung und einem geringen Anteil von Cellulosemikrofibrillen bei hohem Ligninanteil ist schwer erkennbar

- die *Sekundärwand* (S) mit einem ausgesprochenen lamellaren Schichtenaufbau bei paralleler Fibrillenorientierung hat einen hohen Anteil von Cellulosemikrofibrillen bei geringem Ligninanteil. Es werden drei Wand-schichten unterschieden:
 - die dünne *äußere Sekundärwand* (S1), der Primärwand anliegend, auch als Übergangslamelle bezeichnet
 - die *zentrale Sekundärwand* (S2), den Hauptteil der Zellwand bildend, daher für die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Holzes von besonderer Bedeutung
 - die auch als *Tertiärwand* bezeichnete *innere Sekundärwand* (S3) grenzt an den Zellhohlraum an. Sie ist wiederum sehr dünn und hat eine parallele Fibrillenorientierung. Eine Warzenschicht kann als innerer Zellwandabschluss die Tertiärwand bedecken. Sie ist gegenüber Lösungsmitteln, Braun- und Moderfäulepilzen ziemlich widerstandsfähig

Der parallel-spiralige Fibrillenwinkel zur Zell-Längsachse beträgt bei der S1 60 bis 80°, bei der S2 10 bis 30° und bei der S3 60 bis 90°.

Die unterschiedlichen Dicken der Zellwandschichten mit dem unterschiedlichen Verlauf der Cellulosemikrofibrillen und den damit verbundenen unterschiedlichen Anteilen von Cellulose, Hemicellulose und Lignin ergeben in ihrer Gesamtheit ein mechanisch sehr widerstandsfähiges Gerüst mit einem sandwichähnlichen Aufbau. Nur so ist die hohe Festigkeit des Holzes erklärbar.

Die *Aufbauentwicklung* der Zellwand bis zu ihrem Strukturbild erfolgt grundsätzlich von der Glucose (bei der Pflanzenassimilation entstehend) über die Cellulosemakromoleküle, Elementarfibrillen, Mikrofibrillen, Fibrillen, Mikrolamellen und Zellwandschichten. In den Zwischenräumen zwischen den Elementar- und Mikrofibrillen, nur wenige Nanometer groß, geschieht die Einlagerung von Wassermolekülen (Inter-mizellarräume) und Ligninmolekülen (Interfibrillarräume). Damit sind die unterschiedlichen physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Holzes mit ableitbar.

Als *Besonderheiten der Zellwand* sind verschieden gestaltete Verdickungen anzusehen. Sie können schraubig, leisten- oder kegelförmig sein. Diese Verdickungen dienen mit als Bestimmungsmerkmal. Eine weitere Besonderheit sind die im Abschnitt „Besonderheiten der Holzstruktur“ erwähnten verschieden gestalteten Zellwandöffnungen bzw. -durchbrechungen, auch als Tüpfel bekannt. Sie erscheinen als Hoftüpfel (Bild 1.22) oder einfache Tüpfel in den jeweiligen Holzellen und sind für verschiedene Holzeigenschaften von Bedeutung (z. B. Holztrocknung, Holzimprägnierung) [1]; [2].

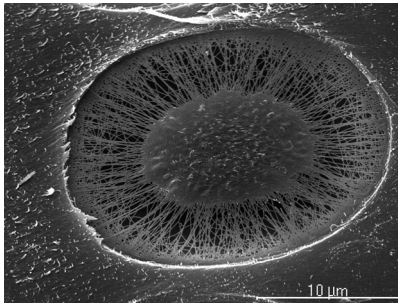


Bild 1.22: Hoftüpfel im Bereich einer Längstracheide bei Fichte (REM-Aufnahme); Torus (Mitte) mit deutlichen Haltefäden (Quelle: E. Bäucker, Dresden)

1.2.1.4 Strukturveränderungen

Strukturveränderungen sind Abweichungen von der normalen Holzstruktur, sie werden auch als Fehler der Holzstruktur bezeichnet und zählen neben den Fehlern der Stammform zu den Wuchsfehlern.

Zu den wichtigsten Strukturveränderungen zählen die *Sondergewebe* wie das *Reaktionsholz* und *Wundholz*, weiterhin auffallende *Faserabweichungen*, fehlerhafte Kernholz- und Zuwachszonenausbildungen sowie *Farbfehler* und im gewissen Sinne auch die Astigkeit.

Reaktionsholz, Druckholz, Zugholz

Reaktionsholz ist ein aktives Richtgewebe des Baumes, das versucht, die aus der ursprünglichen Lage gebrachten Baumteile (Stamm, Äste) wieder in ihre Normalstellung zurückzuführen. Dabei entstehen Zonen vermehrten Zuwachses, bei den Nadelhölzern auf der Unterseite, bei den Laubhölzern auf der Oberseite von Stämmen oder Ästen. Reaktionsholz unterscheidet sich anatomisch, chemisch und physikalisch-mechanisch vom Normalholz. Verbunden ist Reaktionsholz meist mit einem *exzentrischen Wuchs*, bei dem der Kern aus der Mitte des Stammquerschnittes verschoben ist.

Druckholz entsteht an der Unterseite schief gestellter Stämme und Äste von Nadelhölzern. Es hebt sich vom Normalholz durch seine dunklere rötlichbraune Färbung ab, daher auch die Bezeichnung *Rotholz*. Innerhalb der Jahrringe ist eine Unterscheidung zwischen Früh- und Spätholz kaum noch möglich, da auch die Frühholztracheiden dickwandig sind. Druckholz hat infolge erhöhter Lignineinlagerung eine höhere Härte und Rohdichte sowie ein stärkeres axiales Schwindmaß als Normalholz. Druckholztracheiden zeigen eine typische Faltenbildung der zentralen Sekundärwand.

Zugholz entsteht an der Oberseite schief stehender oder einseitig belasteter Laubholzstämmen. Es hat eine weißliche Färbung und wird daher auch als *Weißholz* bezeichnet. Zugholz bewirkt Zugspannungen und Verformungserscheinungen, die Schwindung ist sehr hoch und die mechanische Bearbeitung erschwert (z. B. wollige Holzoberfläche). Der Ligningehalt ist geringer und der Cellulosegehalt höher als beim Normalholz. Zugholzfaseren besitzen eine dicke, quellbare, unverholzte und gelatinöse Zellwandschicht. Der chemische Nachweis von Zugholz ist mit Auftrag einer Chlor-Zink-Jod-Lösung möglich, wobei sich die Zugholzzonen dunkel verfärben, so insbesondere bei helleren Holzarten.

Wundholz

Wundholz ist ebenfalls ein Sondergewebe und entsteht bei größeren Verletzungen des Baumes als Schutzholz mit einem hohen Anteil von Parenchymzellen. Die Wundstellen werden dabei teilweise oder völlig überwallt. Das nur aufgelagerte Wundholz hat einen unregelmäßigen Faserverlauf, schwindet ungleich, neigt zum Verwerfen und Verziehen und ist daher schwer bearbeitbar. Überwallt werden neben Verletzungen aber auch Aststummel und Fremdkörper. Wundholz ist grundsätzlich verschiedenen Schädigungen stärker ausgesetzt als Normalholz (z. B. Frost, Hitze, Pilze, Insekten). Auch die sog. *Markflecken* der Birke und Erle als Wundnarbengewebe zählen zum Wundholz.

Faserabweichungen

Faserabweichungen vom geraden Faserverlauf können tangential, radial, spiralförmig oder auch völlig unregelmäßig auftreten.

Drei Hauptformen werden unterschieden:

Tangential oder/und radial gewellter Faserverlauf führt u. a. zu eindrucksvollen Texturen (s. Abschn. 1.2.1.3, Holztexturen).

Spiralförmiger Faserverlauf um die Stammachse führt zu einem *Drehwuchs*, der links- oder rechtsdrehend sein kann oder auch im gleichen Stamm wechseln kann. Drehwuchs ist bereits am Rindenbild erkennbar. Typische Holzarten sind Kiefer, Fichte, Tanne, Lärche, Eiche, Rosskastanie und verschiedene Obstbäume. Drehwüchsiges Holz verzieht sich beim Trocknen, die Bearbeitung ist erschwert und die Festigkeitseigenschaften sind bei hohen Drehwuchsprozenten geringer. Eine Sonderform ist der sog. *Wechseldrehwuchs* bei zahlreichen Tropenhölzern (z. B. Sapelli, Sipo), indem periodisch in unterschiedlichen Drehwinkeln ein schichtweise tangentialer Faserverlauf vorliegt. Ein derartiger Faserverlauf führt im Radialschnitt zu dekorativen gestreiften Texturen.

Unregelmäßiger Faserverlauf ist beim sog. *Wilden Wuchs* anzutreffen. Es handelt sich dabei um eine Häufung von Holzfehlern am unteren Stammteil. Derartiges Holz hat geminderte physikalisch-mechanische Eigenschaften und erschwert die Bearbeitung beachtlich.

Fehlerhafte Kernholzbildungen und unregelmäßige Zuwachszonen

Hierzu gehören die zu den sog. *Falschkernen* zählenden fakultativen Farbkerne, z. B. der *Rotkern* der Rotbuche, der *Braunkern* der Esche und der *Dunkelkern* von Pappel, Erle, Birke, Ahorn, Birnbaum u. a. Holzarten. Die Form dieser Falschkerne auf dem Querschnitt kann rundlich, wolkig oder zackenartig sein und stimmt nicht unbedingt mit dem Jahrringverlauf überein. Das Holz ist größtenteils schwieriger bearbeitbar und schränkt den Verwendungszweck ein, kann aber für besondere Verwendungsgebiete wiederum dekorativ wirken, wie der Rotkern der Rotbuche.

Zur fehlerhaften Kernholzbildung zählen noch die *ungenügende Verkernung*, wenn nur geringe Kernholzanteile vorliegen (z. B. bei Nussbaum), und die *unvollständige Verkernung*, wenn unverkernte Zonen mit verkernten abwechseln, sodass auf dem Querschnitt ring- bis streifenförmige Zonen entstehen. Diese auch als *Mondringe* bezeichneten unverkernten Streifen sind z. B. bei Eiche, Robinie, Ruster und Nussbaum anzutreffen.

Auch die mit einem *exzentrischen Wuchs* verbundene *außermittige Kernverlagerung* zählt zu den fehlerhaften Kernholzbildungen. Die genannten Kernholzeigenheiten führen größtenteils zur Einschränkung des Verwendungszwecks, insbesondere bei Furnierholz.

Ein ungleichmäßiger Jahrring- bzw. Zuwachszonenverlauf führt zu einem schroffen Wechsel der Zonen, oft schon während einer Vegetationsperiode entstanden. Begleitet werden diese Zonen vielfach von Kernverlagerungen, Ringrissen und Reaktionsholz. Bearbeitung und Verwendung des Holzes sind erschwert.

Farbfehler

Farbfehler sind Abweichungen von der normalen Holzfarbe der jeweiligen Holzarten. Sie sind überwiegend auf physiologische, pathologische und chemische Einflüsse zurückzuführen. Sie führen zu einer Minderung der Holzqualität und -verwendung. Neben den schon erwähnten fehlerhaften Kernholzbildungen zählen strukturbedingte und oxidative Veränderungen sowie durch Pilz- und Insektenbefall entstandene Verfärbungen hierzu. Es sind überwiegend streifen- oder zonenförmige Farbabweichungen von der normalen arteigenen Holzfarbe. Im Einzelnen werden unterschieden:

- *dunkle Ringe*, mehrere Jahrringe breit, sog. Wasserstreifen, z.B. bei Eiche
- *Blaufärbung* als oxidative Verfärbung bei gerbstoffreichen Holzarten, z.B. bei Eiche, Makoré
- *Bläuel/Verblauung* als pilzliche Verfärbung des Splint- oder Reifholzes; flecken- bis streifenförmig z.B. bei Kiefer-Splintholz oder Fichten-Reifholz
- *Grünfärbung* als oxidative Verfärbung, auf holzeigene beizaktive Inhaltsstoffe und eisenhaltiges Wasser zurückzuführen, z.B. bei Erle, Linde, Rüster
- *Braunfärbung* (Stammbräune) und Braunstreifigkeit als oxidative Verfärbung, größtenteils schon nach der Fällung des Baumes entstehend, flecken- oder streifenförmig auftretend, auch als Einlauf oder Eingraung bezeichnet, so z.B. bei Eiche, Ahorn, Erle, Birke, Rotbuche
- *Braunfleckigkeit* als unregelmäßig angeordnete Wundgewebean-sammlung infolge von Insektenschädigung entstanden, z.B. bei Birke, Erle, Pappel, Weide; auch als *Markfleckigkeit* bezeichnet
- verschiedenartige flecken- oder streifenförmige Verfärbungen und Zerstörungen des Holzes, durch holzerstörende Pilze verursacht, z.B. bräunliche, rötliche oder weißliche Verfärbungen; als *Braun-* oder *Weißfäule* auftretend [1]

1.2.2 Holzarten

1.2.2.1 Benennungen

Jede Holzart hat einen ihr zugeordneten Namen, sei es die wissenschaftliche, handelsübliche, standardisierte oder lokale Benennung (Bild 1.23).

Die *wissenschaftliche (botanische) Benennung* setzt sich aus dem Gattungs- und Artnamen zusammen und ist einer Pflanzenfamilie zugeordnet. Die vollständige wissenschaftliche Benennung enthält noch den Namen des Autors, der den betreffenden Baum bzw. die Holzart beschrieben und pflanzensystematisch eingeordnet hat.

Beispiel Rotbuche:

Fagus sylvatica L. Familie *Fagaceae* Code FASY

Beispiel Fichte:

Picea abies (L.)Karst. Familie *Pinaceae* Code PCAB

(L. = Carl von Linné; Karst. = Hermann Karsten)

Die richtige *Angabe des Handelsnamens* ist von besonderer Bedeutung, sei es für die Beschreibung, die Einschätzung der Eigenschaften, die Bearbeitung, den Handel und den Verwendungszweck der betreffenden

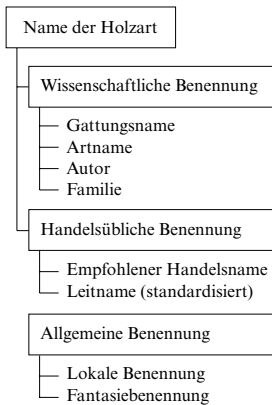


Bild 1.23: Klassifizierung der Holzartennamen [1]

Holzart. Empfohlen werden sogenannte „Leitnamen“, um Verwechslungen zu vermeiden, wobei diese Leitnamen auch in nationale und internationale Standards einfließen, z.B. in Deutschland in die DIN EN 13556 mit deutschen, englischen und französischen Standardnamen und einer Code-Bezeichnung.

Bei der Anwendung *allgemeiner oder lokaler Benennungen* kommt es oft zu Fantasiebezeichnungen, zumal es mit der Einfuhr neuer Holzarten oft Verständigungsschwierigkeiten gibt. Es sollte vermieden werden, lokale Benennungen bedenkenlos zu übernehmen und durch Schreib- oder Druckfehler den Namenswirrwarr noch zu vergrößern.

Folgende Nomenklatureigenheiten können auftreten [3]; [4]:

- Nur **einer** botanischen Art ist **eine** handelsübliche Benennung zugeordnet: z. B. Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche; Rotbuche, Esche, Birnbaum, Robinie, Europ. Eiche, Europ. Kirschbaum, Bergahorn, Nussbaum, Aspe, Edelkastanie, Okoumé, Sapelli, Makoré, Limba, Abachi (Obeche), Balsa, Amerik. Mahagoni, Cocobolo, Makassar-Ebenholz, Teak, Ostind. Palisander u. a.
- **Mehreren** botanischen Arten ist **eine** spezielle handelsübliche Benennung zugeordnet: z. B. Linde, Afrik. Mahagoni, Bubinga, Hickory, Amaranth, Cedro, Pockholz, Pyinkado, Bintangor u. a.
- Es ist auch möglich, dass **einer** botanischen Art **mehrere** handelsübliche Benennungen zugeordnet werden oder dass mehrere botanische Arten und Gattungen für eine handelsübliche Benennung stehen.

- Weiterhin kann der botanische Gattungsname zu einem nationalen Handelsnamen werden, z.B. bei *Mansonia* = Bété; *Calophyllum* = Bintangor; *Eucalyptus* = Blue gum; *Afzelia* = Doussié; *Berlinia* = Ebiara; *Khaya* = Afrik. Mahagoni; *Swietenia* = Amerik. Mahagoni; *Tetraberlinia* = Ekaba; *Alstonia* = Emien; *Daniellia* = Faro; *Ceiba* = Fromager, *Agathis* = Kauri; *Pterygota* = Koto; *Sequoia* = Redwood u.a.

Grundsätzlich sollten folgende Fantasienamen vermieden werden:

- „Afrik. Eiche“ für Azobé und Iroko
- „Indische Eiche“ für Teak
- „Afrik. Eisenholz“ für Azobé
- „Burma-Eisenholz“ für Pyinkado
- „Afrik. Birnbaum“ für Makoré und Douka
- „Afrik. Nussbaum“ für Dibétou und Mutenye
- „Afrik. Zitronenholz“ für Movingui
- „Feuerland-Kirschbaum“ für Coigué und Rauli
- „Ebenholz“ für Grenadill
- „Rosenholz“ für Bubinga
- „Mahagoni“ für Sapelli, Sipo, Tiama, Okoumé u. a.
- „Chilenischer Mahagoni“ für Rauli
- „Rotes Tola“ für Tchitola
- „Afrik. Palisander“ für Wengé
- „Yang-Teak“ für Yang

1.2.2.2 Bestimmungen

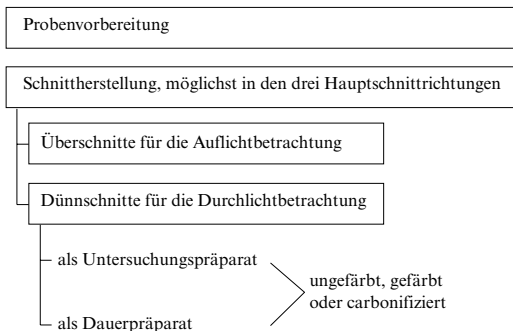
Die Bestimmung bzw. Identifizierung von Holzarten ist in vielen Bereichen von großer Bedeutung. Sie dient insbesondere dem zielgerichteten Holzarteneinsatz, der Qualitätssicherung des Endprodukts, der Dokumentation und Katalogisierung hölzerner Gegenstände, aber auch der wissenschaftlichen Einordnung einer Holzart und der einwandfreien monografischen Beschreibung. Holzartenbestimmungen erfolgen an den verschiedensten Probengrößen, so an Rund- und Schnittholzabschnitten, Furnierstücken, Holzspänen, Holzsplittern oder Holzpartikeln; sei es für die holzbearbeitende und -verarbeitende Industrie und das Holzhandwerk, für Holzrestauratoren, Holzdenkmalpfleger, Kunstsammlungen, Museen u.a. Grundlage ist die genaue Kenntnis der Holzstruktur, der Bestimmungsmethoden und deren Hilfsmittel [1]; [2].

Grundlagen

Wichtige *Hilfsmittel* für die Holzartenbestimmung sind Vergleichsmuster (Vollholz, Furnier), Vergleichspräparate (Holzdünnschnitte für die Mikroskopie), Bestimmungsschlüssel, -karteien, -dateien und Holzartenbeschreibungen in der Fachliteratur.

Vergleichsmuster und *Vergleichspräparate* sollten von zuverlässigen Lieferanten stammen. Für die eigene Anfertigung von Holzschnitten sind Kenntnisse der Mikrotomie, Mikroskopie und Mikrofotografie erforderlich. Das Mikrotom dient insbesondere der Herstellung von Überschnitten für Auflichtbetrachtungen und von Dünnschnitten für Durchlichtuntersuchungen. Über- und Dünnschnitte können aber auch je nach Probengröße mittels Rasiermesser (plan geschliffen), Skalpell oder Industrieklinge hergestellt werden. Die Probenvorbereitung, das Schneiden, das evtl. erforderliche Färben und Einbetten der Dünnschnitte ist zeitaufwendig und will verstanden sein (Bild 1.24). Je nach Partikelgröße und -zustand ist es mitunter erforderlich, vor dem Schneiden eine künstliche Versteifung des Objekts vorzuschalten, z. B. das Glycerin-Gelatine-, Paraffin-, Celloidin-, Wachs- oder Kunststoff-Einbettverfahren.

In der Mikroskopie ist es wünschenswert, dass Geräte mit vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten zur Verfügung stehen, so für die Beobachtung, Fotografie und Messung. Dies bedeutet Einrichtungen für Auf- und Durchlicht, Hell- und Dunkelfeld, Polarisierung, Fluoreszenz, Mikrofotografie und Mikroprojektion.



Wichtige Arbeitsgänge z. B. für das gefärbte Dauerpräparat:
 Dünnschnitte einfärben (z. B. mit Safranin), auswaschen,
 entwässern, zurichten für den Objektträger, einbetten mit Balsam, trocknen, kenn-
 zeichnen, aufbewahren

Bild 1.24: Herstellung mikroskopierfähiger Holzdünnschnitte [1]

Bestimmungsmerkmale

Als wichtige Bestimmungsmerkmale im makroskopischen und mikroskopischen Bereich der einheimischen Nadel- und Laubhölzer gelten u. a.:

- Im Makrobereich der Nadelhölzer:
die Holzfarbe, insbesondere des Kernholzes bei Farbkernen; die Deutlichkeit der Jahrringe bedingt durch Früh- und Spätholzausbildung sowie deren Breite und Verlauf; die Größe und Verteilung der Harzkanäle (wenn vorhanden).
- Im Makrobereich der Laubhölzer:
die Holzfarbe, insbesondere des Kernholzes bei Farbkernen; die Splintholzfarbe und -breite; Deutlichkeit und Verlauf der Jahrringe; Gefäßanordnung (Porigkeit), -größe, -form, -häufigkeit und -inhalt; Holzstrahlanordnung; Markfleckigkeit (wenn vorhanden); Faser-verlauf; Textur im Radial- und Tangentialschnitt; Nebenmerkmal: Geruch des Holzes.
- Im Mikrobereich der Nadelhölzer:
Zusammensetzung der Holzstrahlen; Verdickungen und Tüpfelungen der Quertracheiden; Tüpfelung im Kreuzungsfeldbereich Längstracheide/Holzstrahlzelle; Größe und Anordnung des Längsparenchym.
- Im Mikrobereich der Laubhölzer:
Gefäßanordnung (Porigkeit), -größe, -inhalt, -enddurchbrechung, -tüpfelung, -wandverdickung, -form; Längsparenchymanordnung; Holzstrahlanordnung, -größe, -zusammensetzung; Tracheidentyp (wenn vorhanden).

Bestimmungsmöglichkeiten

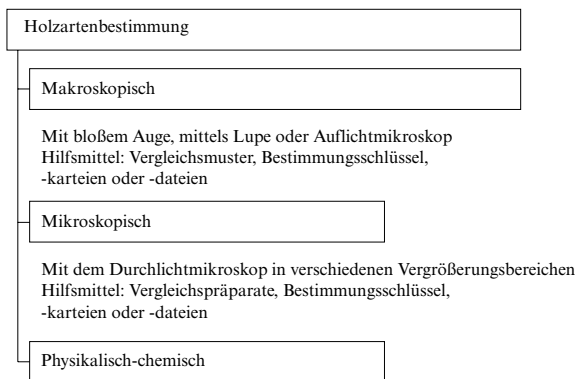


Bild 1.25: Holzartenbestimmungsmöglichkeiten [1]

Holzartenbestimmungen erfolgen im makroskopischen und/oder im mikroskopischen Bereich und oftmals auch ergänzend mittels physikalisch-chemischer Methoden.

Die makroskopische Bestimmung erfolgt je nach Probengröße mit bloßem Auge mit oder ohne Hilfsmittel, mittels Lupe und/oder Auflichtmikroskop unter Verwendung von gedruckten Bestimmungsschlüsseln, Bestimmungskarteien nach dem Lochkartenprinzip oder computergestützten Dateien.

Die mikroskopische Bestimmung erfolgt mittels Durchlichtmikroskop und Dünnschnittpräparaten, wobei wiederum gedruckte Bestimmungsschlüssel, Bestimmungskarteien oder computergestützte Dateien zur Anwendung kommen [1]; [2].

1.3 Chemie des Holzes

Oskar Faix

1.3.1 Holz als Mikro- und Nanoverbundpolymer

Holz ist auf makroskopischer Ebene betrachtet ein Faserverbundwerkstoff. Wie in allen Verbundwerkstoffen sind auch im Holz ungleichartige Elemente in einer besonderen räumlichen Verteilung und Vernetzung so integriert, dass es über bessere Eigenschaften als seine Einzelkomponenten verfügt. Sein Charakter als Verbundwerkstoff setzt sich auf mikroskopischer und submikroskopischer Ebene in der Zellwand fort. Somit ist Holz auch ein Mikro- bzw. **Nanoverbundwerkstoff**. Vom chemischen Standpunkt her ist die Zellwand ein **Bioverbundpolymer**. Diese Bezeichnung verweist auf den biologischen Ursprung und Polymercharakter der elektronenmikroskopisch sichtbaren Strukturen innerhalb der Zellwand.

Die konstitutionellen Bestandteile der Zellwand (= Gerüstsubstanzen) sind die folgenden Polymere: die **Cellulose** (um ca. 43 bis 46 Gew.-%), die **Hemicellulosen** (27 bis 37 Gew.-%; Synonym: Polyosen) und die **Lignine** (20 bis 27 Gew.-%). Diese Prozentangaben sind Durchschnittswerte von Nutzhölzern und beziehen sich auf extrakt- und aschefreies und trockenes Material. Die Bezeichnungen für Hemicellulosen und Lignine werden aufgrund ihrer strukturellen Vielfalt im Plural verwendet. Cellulose und Hemicellulosen sind hydrophyle (wasseranziehende) Polysaccharide, deren Gesamtheit gelegentlich als Holocellulose bezeichnet wird. Die Lignine sind aromatischer Natur und hydrophob (wasserabstoßend).

Die gängige Bezeichnung für Holz als **Lignocellulose** oder als lignocellulosisches Material bringt die enge Verbindung zwischen Polysacchariden

und Ligninen sprachlich zum Ausdruck. In der Lignocellulose liegen die ungleichen Makromoleküle Cellulose, Hemicellulosen und Lignine nicht als ein einfaches Gemisch oder ein Mischpolymerisat, sondern als ein filigranes Gefüge vor, dessen Ausbildung vom genetischen Code in Wechselwirkung mit Umwelteinflüssen gesteuert wird. Man spricht von der übermolekularen Architektur der Zellwand. In diesem Kontext ist die Bezeichnung **extrazelluläre Matrix** für die Zellwand zutreffend, weil der Matrix-Begriff die Gitternatur und Porosität und somit die Durchlässigkeit gegenüber Gasen und Lösungsmitteln veranschaulicht. Die Zellwand ist in Wirklichkeit, der Ausdruck finde Nachsicht, ein mehrschichtiger „Lattenzaun“.

In den Hohlräumen der extrazellulären Matrix, aber auch in den Zelllumina, befinden sich kleinere Moleküle. Diese Substanzen heißen entweder **Inhalts-, Begleit- oder Extraktstoffe** oder **akzessorische Bestandteile**. Ihr Anteil bewegt sich in einem großen Bereich, meistens zwischen 0,5 und 10 Gew.-%. Es gibt aber extraktreichere Holzarten. Noch größer ist die Variationsbreite, was die Anzahl und chemische Natur ihrer Einzelkomponenten betrifft. Nahezu alle chemischen Verbindungsklassen sind hierbei mit Abertausenden von Einzelsubstanzen vertreten. Sie wirken als Hydrophobierungsmittel und als aktiver Schutz gegen Mikroorganismen (als Biozide). Auf Dauer wirksam sind indes nur die in der Zellwand deponierten Inhaltsstoffe. Sie üben teilweise ähnliche Funktionen wie Weichmacher und sonstige Additive in den Kunststoffen aus.

Die **Mineralstoffe** im Holz zählen auch zu den Inhaltsstoffen. Als anorganische Substanzen sind sie mit organischen Lösungsmitteln nicht extrahierbar. Organische wie anorganische Inhaltsstoffe beeinflussen wesentlich die Gebrauchseigenschaften des Holzes: seine Farbe, Abriebfestigkeit, Bearbeitbarkeit und Dauerhaftigkeit, um nur einige wenige zu nennen. Somit sind sie technologisch äußerst relevant. Ein Holztechnologe kommt zwangsläufig mit Begleitstoffen in Berührung, z. B. im Zusammenhang mit Themenkreisen wie Witterungsfestigkeit, Verfärbungsprobleme während der Be- und Verarbeitung und Probleme beim Verleimen und Lackieren.

Zur Beschreibung der extrazellulären Matrix gehört der Hinweis auf das **Wasser** als ihr quasi integraler Bestandteil. Wassermoleküle dringen in die kleinsten Nanostrukturen des lignocellulosischen Verbundpolymers hinein und treten dort mit Gerüstsubstanzen und Inhaltsstoffen in Wechselwirkung. Das allgegenwärtige Wasser bestimmt nicht nur die Widerstandsfähigkeit des Holzes gegenüber Mikroorganismen, sondern auch seine viskoelastischen und chemischen Eigenschaften wesentlich [13], [14].

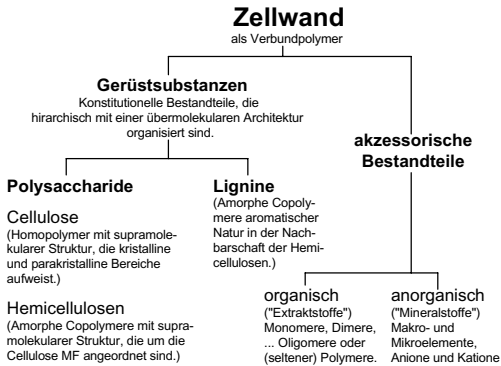


Bild 1.26: Bestandteile der verholzten Zellwand

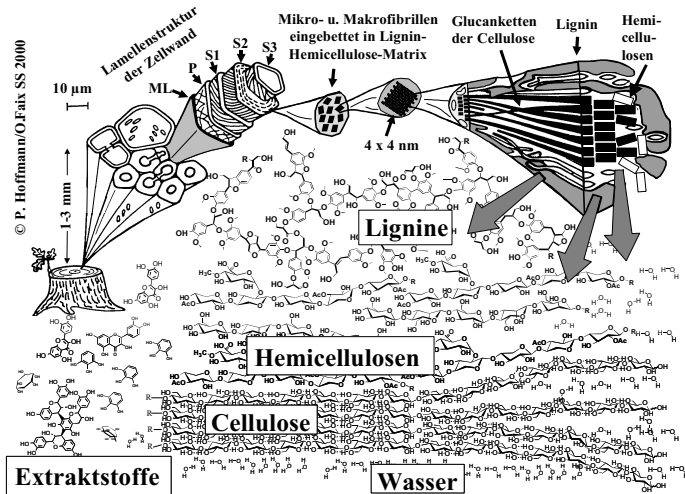
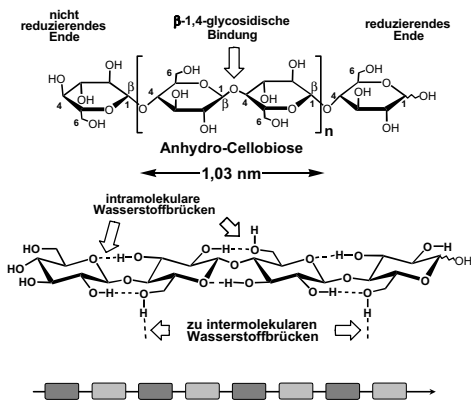


Bild 1.27: Holz als Mikroverbundwerkstoff und Bioverbundpolymer. Das Bild deutet die teilweise kristalline und parakristalline Natur der Cellulose und den amorphen Charakter der Hemicellulosen und der Lignine an. Eine zusammenhängende Einheit (übermolekulares Konstrukt) ist die Mikrofibrille, in der die Celluloseketten von Hemicellulosen und Ligninen umgeben sind. In den Hohlräumen der makromolekularen Gerüstsubstanzen befinden sich die niedermolekularen und oligomeren Extraktstoffe und das Wasser [5].

1.3.2 Cellulose

Die **Primärstruktur** der Cellulose basiert auf linearen Ketten von **Anhydro- β -D-Glucose**-Einheiten (kurz: AHG oder AHGlu). Der Wortstamm „Anhydro“ (lat. *anhydricus* = wasserfrei) bedeutet, dass der Aufbau der Ketten aus Glucosemolekülen, die je ein Wassermolekül verloren haben, gedacht werden kann. Die Summenformel der Glucose lautet $C_6H_{12}O_6$ und die von Cellulose $(C_6H_{10}O_5)_n$, woraus die Wasserabspaltung auch formelmäßig ersichtlich ist.

Wie Bild 1.28 zeigt, sind die Hauptebenen der einzelnen AHGs – definiert durch Ringsauerstoff, C2, C3 und C5 – innerhalb der Kette alternierend um 180° gedreht. Daher sind die AHGs von der räumlichen Anordnung her nicht identisch. Hieraus folgt, dass die kleinste sich wiederholende Einheit der Kette die dimere **Anhydro-Cellobiose** (AHC, auch Cellobiosyl-Einheit genannt) ist. Die benachbarten AHGs sind neben der Hauptvalenzbindung C1–O–C4 (der **glycosidischen Bindung**) durch zwei Wasserstoffbrücken (Ring–O– –H–O–C3 und C2–O–H– –O–C6) zusätzlich verknüpft. Diese Nebenvalezen, symbolisiert durch – – –, spielen mit ihren relativ schwachen Bindungsenergien (15–19 kJ/Mol) in der Chemie der Cellulose und Hemicellulosen, und somit des Holzes, eine prägende Rolle. Die genannten **intramolekularen Wasserstoffbrücken** machen z. B. die Anhydroglucankette steif.



Glucankette
nach der Schreibweise
von Haworth

Glucankette
als Konformationsformel
mit Wasserstoffbrücken

**symbolische
Darstellung**

Bild 1.28: Die Glucankette ist die einfachste strukturelle Untereinheit der Cellulose. Sie hat ein reduzierendes und nicht reduzierendes Ende. Hier ist sie in der Schreibweise nach Haworth und als Konformationsformel dargestellt, wobei nur die letztgenannte Formel die sterischen Verhältnisse im Molekül korrekt beschreibt. Die β -1,4-glycosidische Bindung und die angedeuteten Wasserstoffbrücken bestimmen die wesentlichsten Eigenschaften der Cellulose. Ihre Elementarzusammensetzung lautet: 44,4 % C, 6,2 % H, 49,4 % O [13], [14], [5].

Eine alleinstehende Glucankette ist noch keine Cellulose. Sie entsteht nach Zusammenlagerung („Bündelung“) von mehreren Glucanketten zu Elementar- bzw. Mikrofibrillen. An diesem auch als Agglomeration genannten Prozess sind solche **intermolekularen Wasserstoffbrücken** beteiligt, die von der OH-Gruppe am C6 ausgehen (Bild 1.28).

In diesem Kontext ist die Vergegenwärtigung der **Biogenese** hilfreich (Bild 1.29). Uridindiphosphat-Glucose (**UDP-D-Glucose**) als Cellulose-Vorstufe entsteht im Cytoplasma. In den membrangebundenen **Synthasekomplexen** (= Terminalkomplexe, TMs) werden die UDP-Glucosen zu einer Glucankette zusammengefügt, und zwar so, dass die Ketten von ihrem nichtreduzierenden Ende her wachsen [15].

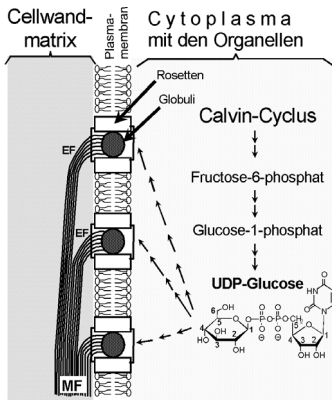


Bild 1.29: Die Biosynthese der Cellulose-vorstufen aus UDP-Glucose im Cytoplasma und die Bildung von Glucanketten in den membrangebundenen Synthasekomplexen (= Terminalkomplexen) und die Zusammenlagerung von Glucanketten in der extrazellulären Matrix zu Elementarfibrillen (EF) und Mikrofibrillen (MF). Rosetten und Globuli sind EM-mikroskopisch erkennbare Strukturelemente der Synthasekomplexe.

Die TMs unterliegen einem dynamischen Prozess der Entstehung, Verschiebung und Auflösung, der durch die „biologische Uhr“ der Zelle gesteuert wird. Durch die kontrollierte Bewegung der TMs in der Zellmembran erklärt man sich die zellwandtypische, von Schicht zu Schicht veränderte Textur der Zellwand bzw. die unterschiedlichen Neigungswinkel der Cellulosefibrillen zur Zellachse (Bild 1.30). Die Bündelung von Glucanketten in der extrazellulären Matrix zu **Elementarfibrillen** (EF) und **Mikrofibrillen** (MF) geschieht durch **Selbstaggregation** nach chemischen Gesetzen, d. h. ohne Mitwirkung von Enzymen.

Während der Bündelung der AHGs zu übermolekularen Agglomeraten können zwei kristalline Grundformen, die **Cellulose I_α** und **I_β**, entstehen. Wenn eine Substanz verschiedene Kristallformen annimmt, spricht der Chemiker von **Polymorphie** (= Allomorphie). Die Polymorphie der Cellulose kommt auch dadurch zum Ausdruck, dass aus den Formen I_α und I_β unter technischen Bedingungen weitere Kristallstrukturen hervorgehen, die mit den römischen Ziffern II, III und IV gekennzeichnet werden.

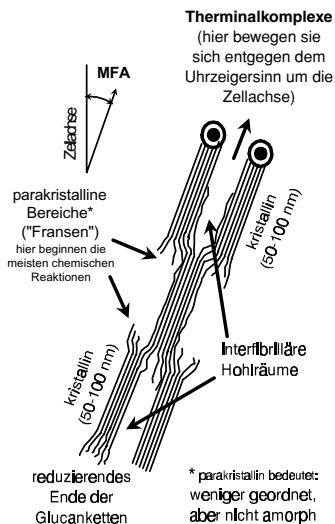


Bild 1.30: Schematische Darstellung des übermolekularen Baus der Cellulose, wobei der Blick von der intrazellulären Matrix her auf die Zellmembran mit zwei Terminalkomplexen gerichtet ist. Das Bild verdeutlicht die Fransen-Fibrillar-Theorie, wonach die Cellulose aus kristallinen und parakristallinen Aggregaten („Fransen“ = weniger geordnete Bereiche) besteht, und den Begriff des Mikrofibrillen-Winkels (MFA, von *microfibril angle*). Die schwach rhomboide Form einer Mikrofibrille hat in der Sekundärwand des Holzes die Dimensionen von 4–4 nm, in der etwa 60 Glucanketten Platz finden können.

Erläuterung zur Kristallinität der Cellulose: Ihre Glucanketten befinden sich an den gedachten Kanten der in Bild 1.31 gezeigten geometrischen Figuren und sind so angeordnet, dass die reduzierenden Enden aller AHGs im Kristallkörper in eine Richtung weisen („**parallele Anordnung**“). Die monokline Form I_β ist im Holz vorherrschend. Die triklin Form ist hauptsächlich in niederen Pflanzen (Algen, Bakterien) verbreitet, ist aber auch in Nadelhölzern häufig anzutreffen. Die Kristallformen I–IV der Cellulose haben die Gemeinsamkeit, dass die längste Kante der Elementarzelle (c) der Länge der Anhydro-Cellobiose (1,04 nm) entspricht. Die anderen Daten sind der Tab. 1.6 zu entnehmen.

Kristalline Formen der natürlichen Cellulose

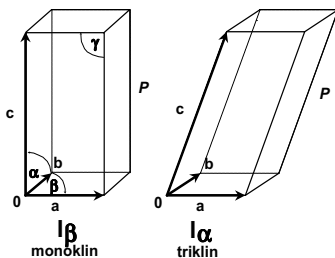


Bild 1.31: Die zwei polymorphen Elementarzellen von der natürlichen Cellulose I, von denen I_β für die monokline und I_α für die triklin Kristallform steht. P bedeutet „primativ“.

I_β : $\alpha = \gamma = 90^\circ$; $\beta \neq 90^\circ$; $a \neq b \neq c$
 I_α : $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$; $a \neq b \neq c$

Tabelle 1.6: Kenngrößen der Cellulose I (nach [17])

Typ	Gitter	Vorkommen	Maße der Elementarzelle (nm)			Winkel in der Elementarzelle (°)		
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	α	β	γ
native Cellulose I_β	monoklin (meta-stabil)	in allen höheren Pflanzen	0,801	0,817	1,036	90	90	83
native Cellulose I_α	triklin (meta-stabil)	in Algen, Bakterien u. Nadelhölzern	0,593	0,674	1,036	63	67	99

Aus Bild 1.32 geht hervor, dass die AHG-Ketten in der I_β -Form alternierend um $1/4$ der Länge der Anhydrocellobiose zueinander versetzt sind. Es gibt demnach zwei Ketten bezüglich ihrer räumlichen Anordnung (**Zweikettenmodell**). In der I_α -Form sind hingegen alle Ketten diesbezüglich gleichwertig (**Einkettenmodell**). Dies ist die Folge der Neigung der Elementarzelle (kein Winkel beträgt 90° , Bild 1.31). Beide Formen sind metastabil (= labil); I_α kann nach thermischer und chemischer Behandlung in die I_β -Form übergehen. Nach Lösen und Fällern der natürlichen Cellulose erhält man die stabile **Regeneratcellulose**, in der die Polymorphie II vorherrscht ($a = 0,8$; $b = 0,9$; $c = 1,04$; $\alpha = 90^\circ$; $\beta = 90^\circ$; $\gamma = 62,9^\circ$).

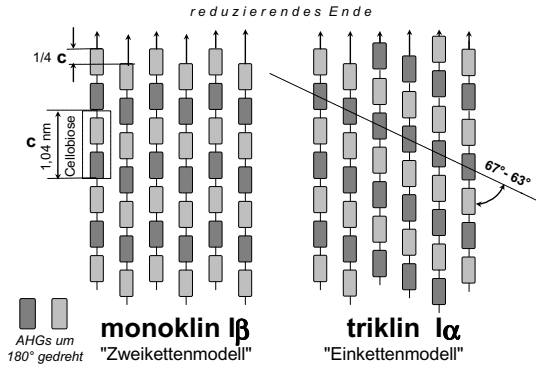


Bild 1.32: Symbolische Darstellung von Anhydroglucanketten in den natürlichen kristallinen Formen der Cellulose I_α und I_β (nach [16])

Der Kristallinitätsgrad von natürlichen Cellulosen variiert in einem weiten Bereich zwischen 50 und 95 % je nach Pflanze/Baum, Zelle, Zellwand-schicht und Isolierungsmethode. Diese Kenngröße ist technologisch relevant: Cellulosen mit hohem Kristallinitätsgrad sind schwerer löslich und reaktionsträger als die mit niedrigerem.

Der **Polymerisationsgrad** (= **DP**, *degree of polymerisation*) ist eine wichtige Kenngröße für Cellulosen. Er gibt die durchschnittliche Anzahl von AHG-Einheiten an, die die Ketten aufbauen. Baumwollcellulose hat z. B. DP-Werte um 14000. Aus Holz können Cellulosen mit DP-Werten um 7000 isoliert werden. Je höher der DP, umso größere Zugfestigkeiten können von einem cellulosehaltigen Produkt (wie von einem Papierblatt) erwartet werden. DP-Werte werden routinemäßig mit Hilfe der Viskosimetrie ermittelt. Hierzu ist die Lösung der Cellulose in schwermetallhaltigen, komplexierenden Lösungsmitteln, z. B. in Cupriethylen-diamin oder Cadmiummethylen-triamin erforderlich.

Die Zugfestigkeit des Holzes hängt nicht nur vom DP, sondern auch von den **Mikrofibrillenwinkeln (MFA)** und von anderen Gegebenheiten der übermolekularen Architektur der extrazellulären Matrix ab.

1.3.3 Hemicellulosen

Ebenso wie für die Cellulose sind für das Verständnis der Hemicellulosen (Synonym: **Polyosen**) zuckerchemische Grundkenntnisse erforderlich (siehe einschlägige Lehrbücher). Die Polyosen bestehen aus diversen **Anhydrohexosen** (*Glucose*, Glu; *Mannose*, Man und *Galactose*, Gal), **Anhydropentosen** (*Xylose*, Xyl und *Arabinose*, Ara) sowie **Anhydrouronsäuren** (*Glucuron-* und *Galacturonsäure*, GluA und GalA) (Bild 1.33). Die zusammenfassende Bezeichnung „Heteropolyosen“ beschreibt daher diese Naturstoffklasse zutreffend.

Die unmittelbaren biochemischen Vorstufen (*precursors*) der Polyosen sind die UDP- und ADP-Derivate der in Bild 1.33 aufgeführten Zucker (s. auch Bild 1.29). Die Variabilität der Hemicellulosen hinsichtlich der Zusammensetzung aus den Anhydrozuckern ist groß. Alle Hemicellulosen haben im Vergleich zu Cellulose niedrigere DP-Werte (< 1000). Im nativen Zustand sind sie amorph (nicht kristallin), weil sperrige Seitengruppen die Ketten an der Kristallisation hindern. Ihre OH-Gruppen sind nur in geringerem Maße durch Wasserstoffbrücken maskiert, daher sind sie um den Faktor 1,6 hydrophyler als die Cellulose. Sie nehmen viel Wasser auf und quellen. Auch für die Quellung des Holzes und für seine Viskoelastizität sind sie überwiegend verantwortlich.

Erläuterung zum folgenden Bild (1.33): Die H-Atome wurden übersichtshalber von den freien Valenzen weggelassen. Ac = Acetylgruppe, $\text{CH}_3\text{-CO-}$; AcO = Acetoxygruppe, $\text{CH}_3\text{-CO-O-}$; Desoxy: Nach Eliminierung eines Sauerstoffs liegt eine Methylgruppe vor. α und β verweisen auf die Stellung der OH-Gruppe in Position 1 bezüglich der Ringebene: **α -Anomerie** unterhalb, **β -Anomerie** oberhalb. D = dextro; L = laevo: Stellung der OH-Gruppe in der vorletzten Position der offenen (Fischer'schen) Kettenform (siehe Lehrbücher).

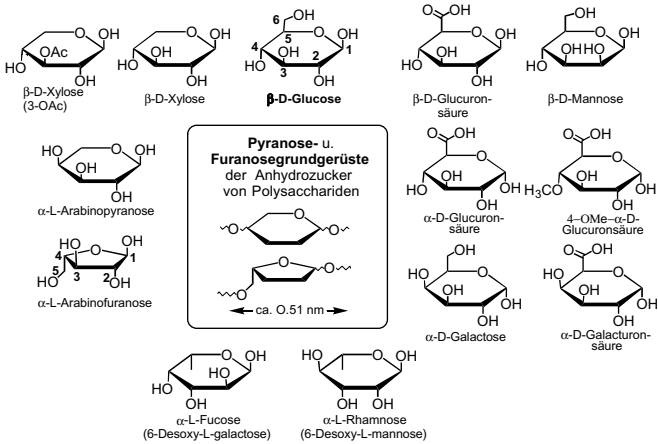


Bild 1.33: Monosaccharide, in der Schreibweise nach Haworth, aus denen nach Wasserabspaltung die Hemicellulosen hervorgehen [13], [14], [5]

Die Hemicellulosen können zunächst vereinfachend nach der Hauptkette in die Gruppe der **Xylane** (gerade Ketten von 1 → 4 glycosidisch gebundenen Anhydroxylosen) und **Glucomannane** (gerade Ketten von 1 → 4 glycosidisch gebundenen Anhydroglucosen und Anhydromannosen) eingeteilt werden. Eine feinere Klassifizierung berücksichtigt die eingliedrigen Seitengruppen (Bilder 1.34 und 1.35).

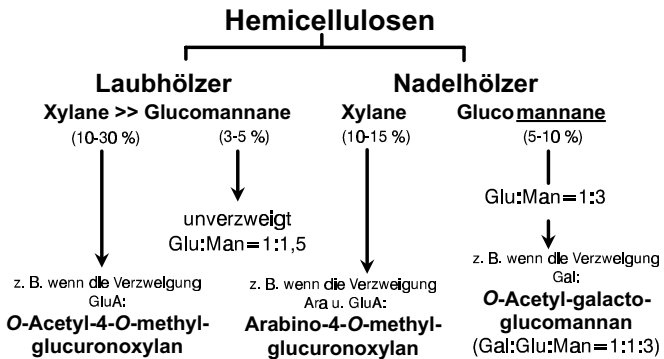


Bild 1.34: Klassifizierung der Hemicellulosen (Polyosen) des Holzes und ihr Vorkommen in Gew.-%