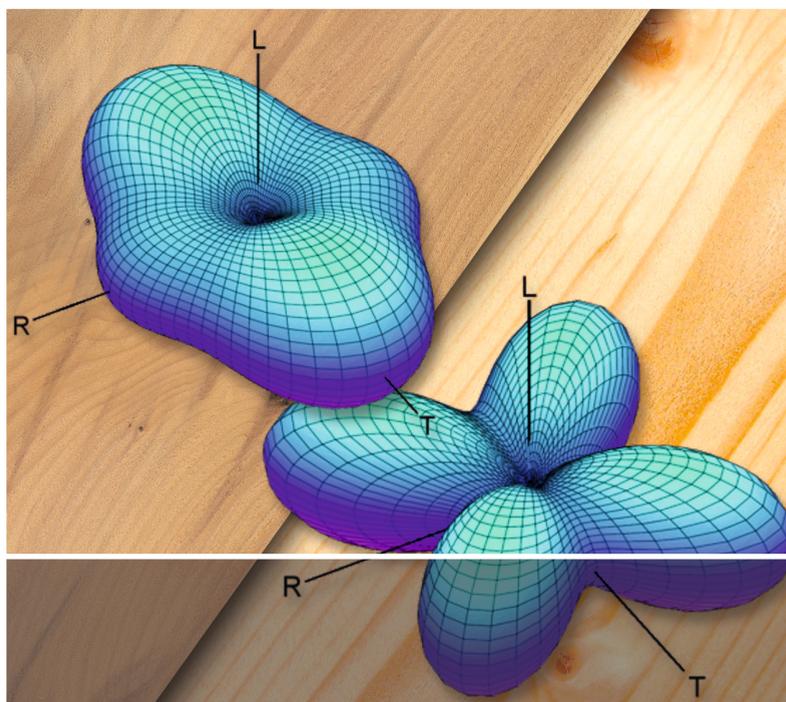


Peter Niemz
Walter Ulrich Sonderegger



Holzphysik

Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte



2., aktualisierte Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-p910q-43ohs

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Autoren:

Prof. i. R. Dr. Ing. habil. Dr. h. c. Peter Niemz

studierte an der TU Dresden Holz- und Faserwerkstofftechnik, 1972 – 1993 Arbeit im IHD Dresden und an der TU Dresden (Hochschuldozent), 1993 bis 1996 Professor für Holztechnologie an der Universidad Austral de Chile, Valdivia/Chile, seit 1997 außerordentlicher Professor an der Universidad Austral de Chile, 1996 – 2015 ETH Zürich, seit 2002 Professor für Holzphysik (Institut für Baustoffe des Departements Bauwesen, Umwelt und Geomatik) der ETH Zürich, seit 2002 Mitglied von IAWS (International Academy of Wood Science), 2009 Ehrendoktor an der Universität Sopron, 2014 Wilhelm-Klauditz-Medaille.

Gastprofessuren an der Universidad Austral de Chile, Valdivia/Chile, der Universität für Bodenkultur in Wien/Österreich, der Landwirtschaftlichen Akademie in Warschau, an den Forstwirtschaftlichen Fakultäten der Universitäten in Kunming und Beijing/China, in Universität Transilvania Braşov/Rumänien und seit 2020 der Luleå University of Technology, Skellefteå/Schweden.

Dr. sc. ETH Walter Sonderegger

Studium der Forstwissenschaften an der ETH Zürich, 2000 – 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Holzwissenschaften und nachfolgend im Bereich Holzphysik des Instituts für Baustoffe der ETH Zürich, 2011 Promotion auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchtetransports in Holz und Holzwerkstoffen mit anschließender Vertiefung des Themas am Paul Scherrer Institut, 2015 bis 2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Wood Materials Science der ETH Zürich. Er ist seit 2016 in der Abteilung Cellulose & Wood Materials der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in Dübendorf sowie seit 2018 zusätzlich bei der Firma Swiss Wood Solutions, Dübendorf, im Bereich der Forschung und Entwicklung und im Qualitätsmanagement tätig.

Peter Niemz

Walter Ulrich Sonderegger

Holzphysik

Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte

2., aktualisierte Auflage

HANSER

Autoren:

Prof. i.R. Dr. Ing. habil. Dr. h. c. Peter Niemz

Dr.sc. ETH Walter Ulrich Sonderegger



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. 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 dürften.

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind 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.

© 2021 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Anne Kurth

Titelbild: © D. Keunecke, ETH Zuerich 2008, Deformationskörper von Eiben- und Fichtenholz (in Anlehnung an Grimsel 1999)

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46749-1

E-Book-ISBN 978-3-446-47010-1

Vorwort

Vorwort zur zweiten Auflage im Carl Hanser Verlag

Das Buch „Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe“ von Peter Niemz erschien 1993 im DRW-Verlag, Stuttgart, in einer ersten Auflage. Nach mehr als 23 Jahren wurde es 2017 in einer deutlich erweiterten Neuauflage im Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag unter Mitarbeit von Dr. Walter Sonderegger als Koautor neu aufgelegt. Die Struktur der Auflage von 1993 und wesentliche Inhalte wurden auch in der Auflage von 2017 beibehalten.

Nachdem die Auflage von 2017 schon nach wenigen Jahren ausverkauft war, haben sich Verlag und Autoren entschlossen, eine geringfügig, insbesondere um Druckfehler korrigierte und im Teil der Normung aktualisierte Neuauflage herauszugeben. Ebenso wurden einige kleinere Anpassungen vorgenommen.

Der rasche Verkauf zeigt das Interesse einer breiten Leserschaft an der Thematik Holz. Das Buch ist zwischenzeitlich in der Lehre und auch in der Praxis im deutschsprachigen Raum gut etabliert und nachgefragt. Man muss das sicher auch im Konsens mit dem deutlich gestiegenen Einsatz von Holz, insbesondere im Bauwesen (auch mehrgeschossiger Holzbau) in den letzten Jahren sehen. Holz und Holzwerkstoffe haben stark an Bedeutung gewonnen.

Neben vielen neuen Werkstoffen (z. B. Brettsperrholz, LVL aus Buche, modifizierte Hölzer) hielt auch die automatisierte Fertigung in der Holzindustrie und insbesondere auch im Holzbau noch stärker Einzug.

Jährlich erscheinen weltweit viele Dissertationen zu Themen aus dem Bereich der Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe und eine sehr große Anzahl an Fachpublikationen, zunehmend in englischer Sprache und oft sehr in die Tiefe gehend (bis hin zur Zellwand und auch dem molekularen Aufbau). Das Buch soll einen Einstieg in die Thematik ermöglichen und den Studierenden das notwendige Grundwissen zur Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe ermöglichen.

Weiterführende Informationen sind auch in meinen Vorlesungsskripten und den Power-Point-Versionen meiner Vorlesungen an der ETH Zürich (Holzphysik, Holztechnologie, zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, und auch einige Skripte zur Holzanatomie) verfügbar, die auf der e-collection der Bibliothek der ETH Zürich abrufbar sind. Zudem wird auf die umfangreiche Literatur in Fachzeitschriften verwiesen.

Eine an der ETH Zürich (Professur für Holzphysik) erarbeitete Datenbank wurde in das Buch integriert und ist über den Hanser Verlag abrufbar. Über den auf Seite 1 angegebenen Link sind die Datenbank und auch eine Anleitung zu deren Benutzung zugänglich.

Die Autoren danken dem Carl Hanser Verlag in München, insbesondere Herrn Frank Katzenmayer, für die sehr gute und unkomplizierte Zusammenarbeit bei der zweiten Neuauflage. Dem DRW-Verlag für die unkomplizierte Übergabe.

Der Dank gilt auch den zahlreichen Fachkollegen, die uns fachliche Hinweise für die Überarbeitung oder Korrekturen gaben.

Zürich, Frühjahr 2021

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Peter Niemz

Vorwort zur ersten Auflage im Carl Hanser Verlag

Mehr als 23 Jahre sind nach der ersten Auflage vergangen. Das Buch ist seit Jahren ausverkauft. Es wurde gut aufgenommen und hat sich bewährt. In Abstimmung mit dem DRW-Verlag wird das Buch „Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe“ nun im Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag neu aufgelegt. Dabei wurde versucht, das Grundprinzip einer kurzgefassten Vermittlung der wesentlichen Inhalte durch Formeln, Bilder und Tabellen mit möglichst wenig Text beizubehalten. Der Abschnitt Modellierung ausgewählter Eigenschaften wurde auf grundlegende Aspekte gekürzt, da auf diesem Gebiet sehr viele Arbeiten entstanden, die ein eigenes Werk bilden würden.

Auf dem Gebiet gibt es aber auch noch zahlreiche Lücken, die es bisher oft nicht erlauben, die Kennwerte sicher zu validieren bzw. zu berechnen. So fehlen Materialkennwerte für plastische Verformungen und zur Mechanosorption nahezu vollständig und ebenso oft komplette Datensätze für die Richtungs-, Feuchte- und Zeitabhängigkeit der Kennwerte. Dies, verbunden mit der großen Variabilität des Holzes, erschwert oft zuverlässige Berechnungen. Diese aufwendigen Forschungen zur Bestimmung von Materialkennwerten an kleinen, fehlerfreien Proben werden heute leider nur noch selten durchgeführt. Des Weiteren können auch Versagensvorgänge und der Einfluss der Holzstrahlen sowie die Wechselwirkungen zwischen den Strukturelementen bisher noch kaum erfasst werden. Hier befinden wir uns noch in der Anfangsphase. Im Buch werden daher lediglich wenige Grundlagen der Werkstoffberechnung behandelt.

Viele Arbeiten erfolgten in den letzten zwei Jahrzehnten zu Fragen der Bruchmechanik (Bestimmung der Bruchzähigkeit und Bruchenergie), der Versagensmechanismen und auch der Orthotropie. Auch erste Arbeiten zur Bestimmung der Zeitabhängigkeit elastischer Konstanten wie der Poissonzahl wurden durchgeführt. Ebenfalls erschienen zahlreiche Arbeiten zur Festigkeitsortierung von Holz.

Große Fortschritte wurden auf dem Gebiet der Messtechnik erreicht. Besonders durch die zerstörungsfreie Prüfung (Ultraschall, Modalanalyse, spektrometrische Methoden zur Eigenschaftsermittlung, Röntgenverfahren (einschließlich Synchrotron und Mikrotomographie, Röntgenstreuung zur Messung des Mikrofibrillenwinkels), Neutronenradiographie und -tomographie, Nanoindentation, Ramanspektroskopie u. a.) wurden Methoden geschaffen, die auch neue Einblicke in die Struktur und die Mechanismen der Strukturänderungen bei Belastung erlauben. Ausgewählte Methoden wie die Spektroskopie, die Laserstrahlung (Tracheideffekt, d.h. Brechung von Laserstrahlen an Holzzellen), die Eigenfrequenzmessung/Modalanalyse, die Röntgentomographie (z. B. Logscanning, Mes-

sung von Rohdichteprofilen in Holzwerkstoffen), die Farbmessung und die optische Fehlererkennung wurden in den letzten Jahren bereits industriell umgesetzt.

Forschungsmäßig ist es heute bereits möglich, in situ Schadensvorgänge mittels Synchrotronstrahlung mit etwa $0,5\ \mu\text{m}$ Auflösung zu analysieren sowie Dehnungen an Probenoberflächen mittels Digital-Image-Korrelation zu erfassen und zeitnah auszuwerten. Die Auflösung der Geräte erhöht sich ständig und auch die Aufnahmegeschwindigkeit.

Auch auf dem Gebiet der Holzwerkstoffe gibt es zahlreiche Fortschritte. So haben heute Massivholzplatten (Brettsperrholz) einen festen Platz im Bauwesen, Furnierschichtholz (LVL) aus Fichte ebenso, LVL aus Buche kommt gerade auf den Markt. Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC) haben einen kleinen, aber steigenden Marktanteil erreicht. Holzfasern und Fasern auf Basis anderer nachwachsender Rohstoffe werden zunehmend als Verstärkungsmaterial für Kunststoffe, z. B. im Fahrzeugbau, eingesetzt. Wieder an Bedeutung gewonnen hat auch seit den 1990er Jahren die Holzmodifizierung, die schon einmal einen Höhepunkt in den 1970er Jahren hatte. Der Schwerpunkt liegt heute insbesondere bei der Umsetzung und der Erforschung der Vorgänge bei der Modifizierung im Bereich der Zellwand.

Durch den Umbau der Wälder stehen wir in Deutschland, Österreich und der Schweiz langfristig vor einer verstärkten Verarbeitung von Laubholz, was auch auf holzphysikalischem Gebiet viele Arbeiten erfordert.

Im Buch wird versucht, den aktuellen Stand weitgehend abzubilden, ohne sich zu sehr in wissenschaftliche Details zu vertiefen, die für den durchschnittlichen (nicht nur in der Wissenschaft tätigen) Leser meist nur am Rande interessant sind. Hier sei auf weiterführende Literatur (Tagungsbände, Monographien) verwiesen. Das Buch soll für Studenten und Praktiker gleichsam ein gewisser Leitfaden sein. Die Zusammenstellung der Normen wurde aktualisiert. Da wo es sinnvoll erschien, wurden auch zurückgezogene Normen mit erwähnt, da häufig dort aufgeführte Kennwerte, aber auch die Methode wichtig sind.

Meinen ehemaligen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Holzphysik am Departement Bau, Umwelt und Geomatik der ETH Zürich, Dr. Michaela Zauner, Sven Schlegel, Melanie Wetzig, Thomas Schnider und Franco Michel danke ich für ihre aktive Mitarbeit bei der technischen Neugestaltung, meinen ehemaligen Doktoranden an der ETH für die langjährige gute Zusammenarbeit, viele ihrer Ergebnisse sind in die Überarbeitung eingeflossen. Herr Dr. Tobias Keplinger, ETH Zürich, Professur Wood Material Science trug wesentlich zur inhaltlichen Gestaltung des Kapitels 15.5 bei.

Vielen Fachkollegen, insbesondere Univ. Prof. Dr. Dr. h. c. Alfred Teischinger, Universität für Bodenkultur, Wien und Prof. Dr. Thomas Volkmer, Berner Fachhochschule, Biel danke ich für ihre Hinweise und Korrekturvorschläge. Herrn Philipp Thorwirth vom Fachbuchverlag danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Erarbeitung der ersten Neuauflage.

Für die Bearbeitung der Neuauflage habe ich Dr. Walter Sonderegger, ehemaliger Doktorand und langjähriger Mitarbeiter und Oberassistent in meiner Arbeitsgruppe an der ETH Zürich als Koautor aufgenommen. Er hat wesentlich an der Überarbeitung der Tabellen, aber auch der Kontrolle der Texte mitgewirkt und die Kapitel Feuchte-Wärme maßgeblich mit überarbeitet. Ebenso wirkte er an der Gesamtedaktion mit. Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Scheffler, Westsächsische Hochschule Zwickau, übernahm es, die Kapitel 13 und 14 (Elastizität und Festigkeit) und 15 fachlich durchzusehen. Herr Dr. Bernd Devantier, IHD Dresden, gab viele fachliche Hinweise für Ergänzungen und Straffungen. Beiden gilt ein besonderer Dank.

Weiterführende Informationen zur Holzphysik sind auf der Homepage der e-collection der Bibliothek der ETH Zürich abzurufen. Dort sind u. a. die Folien der Vorlesungsunterlagen, aber auch Skripte zu meinen Lehrveranstaltungen verfügbar. Im Internet ist zudem der Zugriff auf eine Datenbank zu ausgewählten physikalischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen möglich.

Im Buch wurde neben der zitierten auch weiterführende, nicht zitierte Literatur aufgeführt, die zur Vertiefung dient. Der Verfasser ist den Lesern für Hinweise zu Fehlern, Ergänzungen oder Straffungen dankbar.

Zürich, im Frühjahr 2017

Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Peter Niemz

Vorwort zur ersten Auflage im DRW-Verlag

Kenntnisse über den Roh- und Werkstoff Holz sind eine entscheidende Voraussetzung für dessen Be- und Verarbeitung, aber auch für den Einsatz von Holz und Holzwerkstoffen im Bauwesen und im Möbelbau. Deshalb wendet sich der vorliegende Band „Physik des Holzes“ an alle jene Leser, die vor allem beruflich mit dem Holz zu tun haben und dafür fundierte wissenschaftliche Kenntnisse benötigen.

Der Band ist so konzipiert, dass er einen umfassenden Überblick über die physikalischen Eigenschaften des Holzes gibt, ohne sich in die von Monografien her bekannten fachlichen Details zu verlieren. Wegen ihrer großen Bedeutung mitbehandelt werden die Eigenschaften, insbesondere die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Holzwerkstoffen und die Möglichkeiten ihrer Berechnung. Soweit es möglich war, wurden die angegebenen physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Holz um entsprechende Angaben für Holzwerkstoffe ergänzt. Dabei wurde versucht, dem Leser das Auffinden von Eigenschaftswerten durch die Zusammenstellung von Tabellen zu erleichtern. Als ein Mangel stellte sich heraus, dass Zahlenangaben zu den ausgewählten physikalischen Eigenschaften des Holzes oftmals fehlen; hier bedarf es weiterer Forschungsarbeiten, um diese Lücken zu schließen. Der eingeschlagene Weg der Beschreibung allgemein anerkannter Prüfverfahren für wichtige physikalisch-mechanische Eigenschaften des Holzes und der Holzwerkstoffe konnte wegen lückenhafter Normung nicht immer eingehalten werden. Deshalb wurde verschiedentlich auf Prüfverfahren zurückgegriffen, die in Deutschland nicht gebräuchlich sind (ASTM), in der ehemaligen DDR standardisiert waren (TGL) oder in Werkstandards enthalten sind (Werkstandards des Forschungsinstituts für Holztechnologie bzw. WTZ Holz Dresden).

Die Kapitel 12.2,1, 12.2.2 und 15 dieses Bandes werden vom Verfasser unter maßgeblicher Mitarbeit von Herrn Dr.-Ing. habil. Andreas Hänsel als Vorlesung für das Lehrgebiet Strukturmechanik von Holz und Holzwerkstoffen an der Technischen Universität erarbeitet.

Herrn Dr.-Ing. Richard Kusian danke ich bei dieser Gelegenheit für die sehr gute Zusammenarbeit bei der Lektorierung dieses Bandes. Durch seine Sachkenntnis und seine Vorschläge zur inhaltlichen Gestaltung des Bandes trug er wesentlich zum Gelingen des Buchprojekts bei.

Frau Edeltraud Anisch danke ich an dieser Stelle für die sorgsame Anfertigung der zahlreichen Abbildungen, ebenso Herrn Dipl.-Ing. Andreas Weber für die Hilfe beim Korrekturlesen.

Dem DRW-Verlag danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit bei der Herausgabe dieses Buches.

Der Verfasser ist den Lesern für Hinweise zur Erweiterung, Straffung oder Ergänzung des Buches dankbar.

Dresden, im Frühjahr 1993

Peter Niemz

Datenbank für Kennwerte zum Feuchte- und Wärmetransport in Holz und Holzwerkstoffen

Die Datenbank „Datenbank für Kennwerte zum Feuchte- und Wärmetransport in Holz und Holzwerkstoffen“ wurde im Jahre 2011 an der Professur für Holzphysik der ETH Zürich erarbeitet.

Bearbeiter waren:

Dr. Walter Sonderegger

Dipl.-Ing. (FH) Verena Krackler

Dr. Matus Joscak

Prof. Dr. Peter Niemz

Sie entstand in Zusammenarbeit der ETH Zürich mit dem Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Industriepartnern. Sie basiert insbesondere auf einer Zusammenstellung von über mehr als 10 Jahre durchgeführten Messungen an der Professur Holzphysik der ETH Zürich. Diese Arbeiten sind in der Datenbank dokumentiert. Die Daten basieren auf Messungen bis Mitte 2011, spätere Arbeiten wurden nicht integriert.

Über den auf Seite 1 angegebenen Link des Carl Hanser Verlages ist die Datenbank zugänglich.

Sie ermöglicht es, Kennwerte wie Sorptionsisothermen, Wärmeleitfähigkeit, Diffusionswiderstand für verschiedene Holzarten und Holzwerkstoffe zu suchen, zu erstellen und auszugeben. Eine ausführliche Beschreibung ist im Projektbericht aufgeführt, der ebenfalls über den Link abrufbar ist. Diese Beschreibung dient praktisch als Bedienungsanleitung.

Es sei darauf hingewiesen, dass zu holzanatomischen und ausgewählten holzphysikalischen Merkmalen der Holzatlas von Rudi Wagenführ (7. Auflage 2021) auch in elektronischer Form bereitsteht und neben anatomischen auch eine Vielzahl von physikalischen Kennwerten enthält.

Ebenso gibt es Datenbanken des Johann Heinrich von Thünen-Instituts, Institut für Holzforschung in Hamburg und der TU Dresden, Institut für Naturstofftechnik. Diese sind teils auch frei zugänglich.

Auf die Datenbank **macroHOLZdata**, die auch die technologischen Beschreibungen der 130 wichtigsten Handelshölzer umfasst, kann über das Thünen-Institut, Hamburg zugegriffen werden. Diese wird laufend aktualisiert.

Ferner sind zu Holzwerkstoffen zahlreiche Informationen zu Materialkennwerten über die Herstellerfirmen, die Fachverbände (z.B. dem VHI in Deutschland, proHolz Austria in Österreich, Lignum in der Schweiz) sowie den Informationsdienst Holz in Deutschland verfügbar.

Ausgewählte Daten sind auch im Wood Handbook (Wood as an Engineering Material) des Forest Products Laboratory in Madison, USA online verfügbar. Auch Eurocode 5 enthält eine Vielzahl von Rechenwerten zu Holz und Holzwerkstoffen, die im Holzbau verwendet werden.

Zürich, Frühjahr 2021

Peter Niemz

Inhalt

■	Vorwort	5
■	Datenbank für Kennwerte zum Feuchte- und Wärmehtransport in Holz und Holzwerkstoffen	10
1	Einführung	22
2	Geschichte der Physik des Holzes	31
3	Übersicht zu physikalischen Eigenschaften des Holzes und wichtigen Einflussfaktoren	40
4	Struktur und Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen ...	43
4.1	Vorbemerkungen	43
4.2	Einteilung von Holz und Holzwerkstoffen	44
4.2.1	Holz	44
4.2.2	Holzwerkstoffe	45
4.2.2.1	Werkstoffe auf Vollholzbasis	46
4.2.2.2	Lagenholz/Furnierwerkstoffe	47
4.2.2.3	Spanwerkstoffe	48
4.2.2.4	Faserwerkstoffe	48
4.2.2.5	Verbundplatten	49
4.3	Stofflich-struktureller Aufbau von Holz und Holzwerkstoffen	49
4.3.1	Holz	50
4.3.1.1	Chemischer Aufbau	50
4.3.1.2	Struktureller Aufbau	50
4.3.2	Holzwerkstoffe	53
4.3.2.1	Werkstoffe auf Vollholzbasis	53
4.3.2.2	Werkstoffe auf Furnierbasis	53
4.3.2.3	Werkstoffe auf Spanbasis	55

	4.3.2.4	Werkstoffe auf Faserbasis	57
	4.3.2.5	Verbundwerkstoffe	59
	4.3.2.6	Wood Plastic Composites	60
4.4		Wechselwirkung zwischen Struktur und Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen	61
	4.4.1	Holz	61
	4.4.2	Holzwerkstoffe	63
	4.4.2.1	Brettschichtholz/lamelliertes Holz	63
	4.4.2.2	Lagenholz/Massivholzplatten	63
	4.4.2.3	Spanplatten	65
	4.4.2.4	Faserplatten	67
	4.4.2.5	Verbundplatten	69

5 Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen gegenüber Feuchte .. 73

5.1		Kenngrößen der Holzfeuchte	73
5.2		Grundlagen der Feuchteaufnahme und -abgabe	74
	5.2.1	Holz als kapillarporöser Stoff	74
	5.2.2	Flüssigkeitstransport in kapillarporösen Systemen, Gas- und Wasserpermeabilität	79
	5.2.2.1	Flüssigkeitstransport in senkrechten Kapillaren ...	79
	5.2.2.2	Flüssigkeitstransport in Holz	81
	5.2.2.3	Messung der Gas- und Flüssigkeitspermeabilität ...	83
	5.2.2.4	Diffusion	84
5.3		Feuchteaufnahme und -abgabe von Holz	89
	5.3.1	Grenzbereiche des Systems Holz-Wasser	89
	5.3.2	Feuchteaufnahme durch Sorption	90
	5.3.2.1	Phasen der Sorption	90
	5.3.2.2	Fasersättigungsbereich	93
	5.3.2.3	Modelle zur Beschreibung des Sorptionsverhaltens (Popper & Niemz, 2009) (Hering, 2011)	94
	5.3.2.4	Sorptionsisothermen ausgewählter Holzarten und Werkstoffe	95
	5.3.3	Maximaler Feuchtegehalt von Holz	100
5.4		Quell- und Schwindverhalten von Holz und Holzwerkstoffen	104
	5.4.1	Quell- und Schwindverhalten von Holz	104
	5.4.1.1	Grundlagen	104
	5.4.1.2	Kenngrößen	111
	5.4.2	Quell- und Schwindverhalten von Holzwerkstoffen	114
	5.4.3	Auswirkungen des Quell- und Schwindverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen	115
	5.4.3.1	Holz	115
	5.4.3.2	Holzwerkstoffe	117
5.5		Holzphysikalische Probleme der Trocknung von Schnittholz	118
	5.5.1	Physikalische Vorgänge beim Feuchtetransport	118
	5.5.2	Spannungen und Rissbildung	119
	5.5.3	Zellkollaps	123

5.6	Verfahren zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Holz und Holzwerkstoffen	123
5.6.1	Übersicht	123
5.6.2	Darrmethode	126
5.6.3	Extraktions- oder Destillationsverfahren	127
5.6.4	Widerstandsmessverfahren	128
5.6.5	Dielektrisches Messverfahren	128
5.6.6	Mikrowellen-Verfahren	129
5.6.7	Radiometrische Verfahren und sonstige Verfahren (Kernspintomographie, Neutronen, Röntgen)	129
5.6.8	Spektrometrisches Verfahren	130
5.6.9	Chemisches Verfahren	130
5.6.10	Hygroskopisches Verfahren	130
5.7	Feuchteverteilung im Holz und Ausgleichsfeuchte von Holz im praktischen Gebrauch	131
5.7.1	Feuchteverteilung im lebenden Stamm	131
5.7.2	Ausgleichsfeuchte von Holz im praktischen Gebrauch und Einfluss der Bauteilgeometrie	132
5.8	Bedeutung der Holzfeuchte	136

6 Dichte von Holz und Holzwerkstoffen 142

6.1	Kenngrößen der Dichte	142
6.1.1	Rohdichte	143
6.1.2	Darrdichte (Darr-Rohdichte)	144
6.1.3	Raumdichtezahl	144
6.1.4	Reindichte	145
6.1.5	Porenanteil (Hohlraumanteil)	145
6.1.6	Streudichte/Schüttdichte	146
6.1.7	Flächenbezogene Masse	147
6.1.8	Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene	147
6.2	Einflüsse auf die Dichte und die Dichteverteilung von Holz und Holzwerkstoffen	148
6.2.1	Holz	148
6.2.1.1	Einfluss der Holzart	148
6.2.1.2	Einfluss von Wuchs- und Standortbedingungen sowie der soziologischen Stellung des Baumes im Bestand	149
6.2.1.3	Einfluss struktureller Parameter	150
6.2.2	Span- und Faserplatten	154
6.3	Verfahren zur Dichtebestimmung	155
6.3.1	Konventionelle Methoden	155
6.3.2	Dichtebestimmung mittels elektromagnetischer Wellen und anderen Verfahren	157
6.3.3	Bestimmung des Dichteprofiles an Holzwerkstoffen	161
6.3.3.1	Fräsmethode	161
6.3.3.2	Bohrmethode	161
6.3.3.3	Hobelmethode	162

6.3.3.4	Röntgenmethode	162
6.3.3.5	Messung von Dichteprofilen mittels Gamma- oder Röntgenstrahlen	162
6.3.4	Bestimmung der Streu- und Schüttdichte von Partikeln	163
6.3.5	Bestimmung des Porenanteiles und der Porengrößenverteilung in Holzwerkstoffen	163
6.3.5.1	Quecksilberdruckporosimetrie	163
6.3.5.2	Gasadsorption	164
6.3.5.3	Sonstige Verfahren	164
6.4	Einfluss der Dichte auf die Eigenschaften des Holzes	164

7 Thermische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen 168

7.1	Wärmeleitfähigkeit	168
7.2	Spezifische Wärmekapazität	172
7.3	Temperaturleitfähigkeit	174
7.4	Wärmeausdehnung	175
7.5	Brandverhalten	177
7.5.1	Grundlagen	177
7.5.2	Brandverhalten	181
7.6	Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften des Holzes	186
7.6.1	Kurzzeitige Temperatureinwirkungen	186
7.6.2	Langzeitige Temperatureinwirkung	189
7.7	Nutzung thermischer Eigenschaften des Holzes zur Qualitätskontrolle	190

8 Elektrische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen 195

8.1	Elektrischer Widerstand und Leitfähigkeit	195
8.1.1	Kenngößen	195
8.1.2	Einflüsse auf den elektrischen Widerstand von Holz	196
8.1.3	Prüfverfahren und praktische Nutzung	199
8.2	Dielektrische Eigenschaften	200
8.2.1	Kenngößen	200
8.2.2	Einflüsse auf die Dielektrizitätskonstante von Holz	200
8.2.3	Prüfverfahren und praktische Nutzung	202
8.3	Piezoelektrische Eigenschaften	203
8.3.1	Kenngößen	203
8.3.2	Einflüsse auf den Piezomodul von Holz	203
8.3.3	Prüfverfahren und praktische Nutzung	204
8.4	Magnetische Eigenschaften	205
8.5	Elektrostatische Aufladungen	205

9 Akustische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen 208

9.1	Übersicht	208
9.2	Arten und Ausbreitungsformen von Wellen	208
9.3	Schallgeschwindigkeit	209
9.3.1	Kenngößen	209

9.3.2	Weitere Kenngrößen	213
9.3.3	Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit	215
9.3.4	Ausgewählte Gerätesysteme	217
9.4	Schalldämpfung oder Schallabsorption	219
9.5	Schalldämmung	220
9.6	Schallemission	220
9.6.1	Kenngrößen	220
9.6.2	Einflüsse auf die Schallemission und praktische Nutzung der Schallemissionsanalyse	222
9.6.3	Messsysteme zur Schallemissionsanalyse	227
9.7	Eigenfrequenz und Modalanalyse	230
9.7.1	Bestimmung des Zug-/Druck-Elastizitätsmoduls	230
9.7.2	Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls	231
9.7.3	Bestimmung des Torsionsmoduls	232

10 Reibungseigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen 237

11 Optische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen 241

11.1	Farbe	241
11.1.1	Kennwerte der Farbe	241
11.1.2	Farbänderung	243
11.1.2.1	Wirkung von transparenten Beschichtungen	243
11.1.2.2	Alterung in Innenräumen	243
11.1.2.3	Farbänderung bei Freibewitterung	246
11.2	Sonstige optische Eigenschaften (Tracheideffekt)	246
11.3	Spektrometrische Eigenschaften	247

12 Korrosionsverhalten und Alterung von Holz und Holzwerkstoffen 254

12.1	Übersicht	254
12.2	Einfluss des Klimas und Bestimmung der Klimabeständigkeit	255
12.2.1	Holz	255
12.2.2	Holzwerkstoffe	259
12.3	Alterung von Holz und Holzwerkstoffen	262
12.3.1	Vollholz	262
12.3.2	Holzwerkstoffe	263
12.4	Einfluss der mechanischen Vorbeanspruchung	264
12.5	Einfluss aggressiver Medien	265
12.5.1	Wasser	266
12.5.2	Chemikalien	266
12.5.3	Metalle	267

13	Elastomechanische und inelastische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen	270
13.1	Übersicht	270
13.2	Elastische Eigenschaften	270
13.2.1	Elastizitätsgesetz und Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Hookesches Gesetz)	270
13.2.1.1	Allgemeine Grundlagen im eindimensionalen Belastungsfall	270
13.2.1.2	Verallgemeinertes Hookesches Gesetz für orthotrope Werkstoffe	273
13.2.2	Zur Orthotropie des Holzes und der Holzwerkstoffe	278
13.2.3	Tensortransformation	282
13.3	Kenngößen und deren Messung	285
13.3.1	Elastizitätsmodul (E-Modul)	285
13.3.1.1	Statische Methoden	285
13.3.1.2	Dynamischer E-Modul aus Durchschallung, Eigenfrequenzmessung (Modalanalyse)	288
13.3.2	Schubmodul	289
13.3.2.1	Kenngöße	289
13.3.2.2	Prüfung	290
13.3.3	Poissonzahl	291
13.3.3.1	Kenngöße	291
13.3.3.2	Prüfung	293
13.3.4	Knickung	293
13.3.4.1	Elastische Knickfälle nach Euler	293
13.3.4.2	Nichtelastisches Knicken nach Tetmajer	295
13.4	Materialkennwerte und Einflussfaktoren	295
13.4.1	Übersicht	295
13.4.2	E-Modul und Schubmodul	298
13.4.3	Poissonzahlen	303
13.5	Rheologische Eigenschaften	304
13.5.1	Übersicht	304
13.5.2	Kriechen	306
13.5.2.1	Physikalische Ursachen	306
13.5.2.2	Kenngößen/Prüfung	309
13.5.2.3	Einflussfaktoren	313
13.5.3	Mechanosorptives Verhalten von Holz	321
13.5.4	Spannungsrelaxation	325
13.5.4.1	Physikalische Ursachen	325
13.5.4.2	Kenngößen/Prüfung	325
13.5.4.3	Einflussfaktoren und Materialkennwerte	326
13.5.5	Dauerstandfestigkeit	328
13.5.5.1	Physikalische Ursachen	328
13.5.5.2	Kenngößen/Prüfung	328
13.5.5.3	Einflussfaktoren und Materialkennwerte	328
13.5.6	Rheologische Modelle	330

14	Festigkeitseigenschaften	340
14.1	Übersicht	340
14.2	Wirkung wesentlicher Einflussfaktoren	344
14.2.1	Struktur des Holzes	344
14.2.1.1	Faser-Last-Winkel/Schnitttrichtung	344
14.2.1.2	Rohdichte und Jahrringe	345
14.2.1.3	Astigkeits/Druckholz/Kerbspannungen	347
14.2.2	Klimatische Bedingungen	349
14.2.3	Alterung	353
14.2.4	Vorgeschichte des Holzes	353
14.2.5	Einfluss von Gamma- und Röntgenstrahlung	355
14.2.6	Prüfmethodik	356
14.2.6.1	Belastungsdauer und Belastungsgeschwindigkeit	356
14.2.6.2	Belastungsart	357
14.2.6.3	Probengeometrie	357
14.3	Phänomenologische Beschreibung des Bruchverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen	362
14.3.1	Vollholz	362
14.3.2	Holzwerkstoffe	365
14.3.2.1	Brettschichtholz, Massivholzplatten, Sperrholz	365
14.3.2.2	Partikelwerkstoffe	366
14.4	Ausgewählte Grundlagen der Bruchmechanik	369
14.4.1	Übersicht	369
14.4.2	Prüfmethodik	371
14.4.3	Materialkennwerte und Einflussfaktoren	374
14.5	Festigkeitseigenschaften	378
14.5.1	Übersicht	378
14.5.2	Plastische Eigenschaften	381
14.5.3	Zugfestigkeit	383
14.5.4	Druckfestigkeit	386
14.5.5	Biegefestigkeit	388
14.5.6	Scherfestigkeit	392
14.5.7	Torsionsfestigkeit	395
14.5.8	Spaltfestigkeit	396
14.5.9	Nagel- und Schraubenauszieh widerstand	398
14.5.10	Schlagzähigkeit	399
14.5.11	Dauerschwingfestigkeit	402
14.5.12	Härte und Abnutzungswiderstand	404
14.5.12.1	Härte	404
14.5.12.2	Statische Härteprüfung	405
14.5.12.3	Dynamische Härteprüfung	406
14.5.12.4	Einflussfaktoren und Materialkennwerte	407
14.5.13	Abnutzungswiderstand	408
14.5.13.1	Kenngrößen/Prüfverfahren	409
14.5.13.2	Einflussfaktoren und Materialkennwerte	410

15	Neue innovative Prüfverfahren	419
15.1	Übersicht	419
15.2	Einfluss der Skalierung auf das Messergebnis	420
15.3	Bauteilprüfung und biaxiale Belastung	426
15.4	Messsysteme für Prüfungen im Mikrobereich	427
15.4.1	Dehnungsmessungen	427
15.4.2	In-situ-Testversuche mittels Elektronenmikroskop oder unter Stereomikroskop, Mikro-CT oder im Synchrotron	428
15.4.3	Neutronenradiographie und -tomographie	430
15.4.4	Sylviscan	431
15.5	Messsysteme für Prüfungen im Nanobereich und sonstige Methoden ..	432
15.5.1	Nanoindentierung	432
15.5.2	Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)	433
15.6	Messsysteme für Messungen im Nanobereich	433
15.6.1	RAMAN-Spektroskopie	434
15.6.2	Rasterkraftmikroskopie	436
16	Spannungen und Verformungen in Holz und Holzwerkstoffen .	441
16.1	Wuchsspannungen im Vollholz, Mikrobrüche durch mechanische Belastung	442
16.1.1	Frostrisse	442
16.1.2	Risse infolge von Saugspannungen	442
16.1.3	Wuchsspannungen	442
16.1.4	Verformungen durch Zug- und Druckholz	444
16.1.5	Risse infolge mechanischer Beanspruchung (Sturmschäden) ..	444
16.2	Spannungen und Verformungen von Holzwerkstoffen (Eigenspannungen)	445
16.2.1	Partikelwerkstoffe	445
16.2.2	Werkstoffe auf Vollholzbasis	447
16.3	Spannungen durch äußere, klimatische Einflüsse	449
17	Nutzung holzphysikalischer Eigenschaften zur On-line-Qualitätskontrolle	452
18	Modellierung von Holz und Holzwerkstoffen: Möglichkeiten und Grenzen	458
18.1	Vorbemerkungen	458
18.2	Holz und Holzwerkstoffe	460
18.2.1	Grenzen der Berechenbarkeit	460
18.2.2	Vollholz	463
18.2.3	Holzwerkstoffe	466
18.2.3.1	Lagenholz (Sperrholz, Brettsperrholz)	466
18.2.3.2	Verbundplatten	469
18.2.3.3	Spanplatten	471

18.2.3.4	Faserplatten	477
18.2.3.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	478
18.3	Durch Feuchtewechsel induzierte Spannungen, Verformungen und Versagensvorgänge	479
18.3.1	Ausgewählte FE-Modelle für die Spannungsberechnung	479
18.3.2	Quellung zwischen den Jahrringen	480
18.3.3	Verformung mehrschichtiger Platten	483
18.4	Feuchte- und Wärmetransport	485
19	Verzeichnis wichtiger Kennwerte und Eigenschaften	492
19.1	Allgemeine Kennwerte und Grundlagen	492
19.1.1	Nutzungsklassen von Holz nach Eurocode 5/DIN EN 1995-1-1 und Gebrauchsklassen und Dauerhaftigkeitsklassen	492
19.1.2	Kennzeichnung von Holzwerkstoffen	494
19.1.3	Brandverhalten von Holz und Holzwerkstoffen	495
19.1.4	Holzschädlinge	498
19.2	Eigenschaften von Vollholz	499
19.2.1	Kennwerte von Holz nach DIN 68364:2005	499
19.2.2	Eigenschaften von Vollholz	505
19.2.3	Charakteristische Kennwerte von Vollholz	506
19.2.4	Güteeanforderungen	510
19.2.4.1	Güteeanforderungen an Rund- und Schnittholz (Nadelholz)	510
19.2.4.2	Güteeanforderungen an Rund- und Schnittholz (Laubholz)	513
19.2.4.3	Güteeanforderungen an Rund- und Schnittholz (Nadelholz und Laubholz)	515
19.2.5	Güteeanforderungen an Baurundholz	517
19.2.6	Kennwerte von vergütetem Holz	520
19.2.7	Kennwerte für Quellung und Tränkbarkeit	525
19.2.8	Eigenschaften verschiedener Rindenarten	528
19.2.9	Kennwerte für die Berücksichtigung der Belastungsdauer	529
19.3	Eigenschaften von ausgewählten Holzwerkstoffen	531
19.4	Prüfverfahren zur Ermittlung ausgewählter Festigkeitseigenschaften	544
19.5	Dampfdruck und relative Luftfeuchte	558
19.6	Quellung in Lösungen	558
20	Verzeichnis ausgewählter Normen, Symbole und weiterführender Literatur	562
20.1	Normen	562
20.1.1	Vollholz	562
20.1.2	Holzwerkstoffe	565
20.1.3	Verklebung	570
20.1.4	Holzschutz	571
20.1.5	Formaldehydbestimmung	572

20.1.6	Holzbau	573
20.1.7	Dämmstoffe	574
20.1.8	WPC	574
20.2	Wichtige Symbole	575
20.3	Ausgewählte weiterführende Literatur	575

	Index	579
---	--------------------	------------

1

Einführung

Holz gehört neben Kohle, Erdöl und Erdgas zu den wichtigsten auf der Erde vorkommenden Rohstoffen. Seine wirtschaftliche Bedeutung verdankt es der Existenz von großen, über das Festland der Erde verteilten Wäldern und anderen Gehölzformationen, die Holz in mehr oder weniger großen Mengen erzeugen und bevorraten (akkumulieren).

Gegenwärtig sind rund 31 % des Festlandes der Erde, das sind $4000 \cdot 10^6$ ha, von Wäldern und anderen Gehölzformationen bedeckt. Weitere $1100 \cdot 10^6$ ha sind andere Gehölzformen (9 %) (Schmithüsen, et al., 2014). In den Wäldern der Erde sind etwa $1000 \cdot 10^9$ t Phytomasse (lebendes pflanzliches Material) – angegeben als organische Trockensubstanz – akkumuliert, wobei jährlich $50 \cdot 10^9$ t zuwachsen. Dabei werden jährlich $24 \cdot 10^9$ t Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben ((Steinlin, 1979) und (Thomasius, 1981)).

Wie aus Tabelle 1.1 hervorgeht, entfallen mehr als die Hälfte der Fläche (52 %), des Vorrates (56 %) und des jährlichen Zuwachses (62 %) auf Wälder in den tropischen und subtropischen Gebieten der Erde. In diesen Gebieten haben die Kleinlaubwälder, Dornbusch- und Hartlaubgehölze, Baum- und Strauchsavannen zwar einen hohen Flächenanteil, ihre Vorrats- und Zuwachswerte sind jedoch gering. Überdurchschnittlich ist die jährliche Stoffproduktion dagegen in den immergrünen tropischen Breitlaubwäldern, wo Werte von 30 bis 35 t organische Trockensubstanz je Jahr und Hektar (im Mittel 20,6 t/a und ha) erreicht werden und bis zu 400 – 600 t organische Trockensubstanz je Hektar akkumuliert sein können.

Nur etwa 22 % der Gesamtwaldfläche der Erde entfallen auf die gemäßigten Gebiete, wobei die immer- und sommergrünen Breitlaubwälder sowohl den dominierenden Anteil am Vorrat als auch am jährlichen Zuwachs haben. Bei optimaler Wasserversorgung – z. B. in den Auenwäldern an Flussläufen – können bis zu 400 t organische Trockensubstanz je Hektar akkumuliert und jährlich bis zu 20 t organische Trockensubstanz je Hektar produziert werden.

Die Wälder in den borealen Gebieten sind zu rund einem Viertel (26 %) an der Gesamtwaldfläche, zu einem Fünftel (20 %) am Gesamtvorrat und zu einem Sechstel (17 %) am gesamten jährlichen Zuwachs an Phytomasse in den Wäldern der Erde beteiligt. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Gebiet die auf der gesamten nördlichen Erdhalbkugel verbreiteten Nadelwälder, die jährlich 2 bis 8 t organische Trockensubstanz je Hektar erzeugen können und insgesamt 70 bis 200 t je Hektar akkumulieren.

Die Kohlenstoffspeicherung des Waldes (gemessen in metrischen Tonnen) betrug allein in Europa 46 Mrd. metrische Tonnen im Jahre 2010. Davon sind 80 % überirdische (Stamm-

holz, Äste, Reisig) und 20 % unterirdische Biomasse (Wurzeln) (Schmithüsen, et al., 2014). Damit wird auch die Bedeutung des Waldes zur Senkung des CO₂ deutlich. Für die europäischen Länder stieg die Kohlenstoffspeicherung zwischen 2005 bis 2010 um jährlich 0,5 %.

Tabelle 1.1 Rohstoffpotenzial von Wäldern und anderen Gehölzformationen (nach (Steinlin, 1979) (Thomasius, 1981))

Vegetationsgebiete	Fläche	Vorrat an Trockenmasse		Zuwachs an Trockenmasse	
	in 10 ⁶ ha	in 10 ⁹ t	in t/ha	in 10 ⁹ t/a	in t/a ha
1. Tropische und subtropische Gebiete					
Immer- und regengrüne Breitlaubwälder	1134 (25 %)	484,0 (49 %)	426,8	23,4 (45 %)	20,6
Offene Kleinlaubwälder, Dornbusch und Hartlaubgehölze, Baum- und Strauchsavannen	1219 (27 %)	73,3 (7 %)	60,1	8,5 (17 %)	7,0
2. Gemäßigte (temperierte) Gebiete					
Immer- und sommergrüne Breitlaubwälder	712 (16 %)	218,9 (22 %)	307,4	8,7 (17 %)	12,3
Waldsteppen, Dornbusch und Hartlaubgehölze	267 (6 %)	21,7 (2 %)	81,3	2,0 (4 %)	7,5
3. Boreale Gebiete					
Kleinlaubmischwald und Nadelwälder	924 (21 %)	184,8 (19 %)	200	7,4 (14 %)	8,0
Waldtundra	217 (5 %)	13,0 (1 %)	59,9	1,5 (3 %)	6,9
Gesamt	4473	995,7	224,4	51,5	11,6

Verfügbarkeit des Holzes

Von wirtschaftlichem Interesse ist das in der akkumulierten Phytomasse der Wälder enthaltene nutzbare Holz, dessen Menge in m³ oder, forstlichem Sprachgebrauch entsprechend, in „Erntefestmetern“ (Efm oder Fm) angegeben wird. Nach FAO-Daten für das Jahr 2010 betragen die Holzvorräte der Erde 527 · 10⁹ m³ (Schmithüsen, et al., 2014); sie konzentrieren sich vor allem in Südamerika (ungefähr ein Drittel der gesamten Vorräte), in Russland und in Nordamerika, wie Bild 1.1 veranschaulicht.

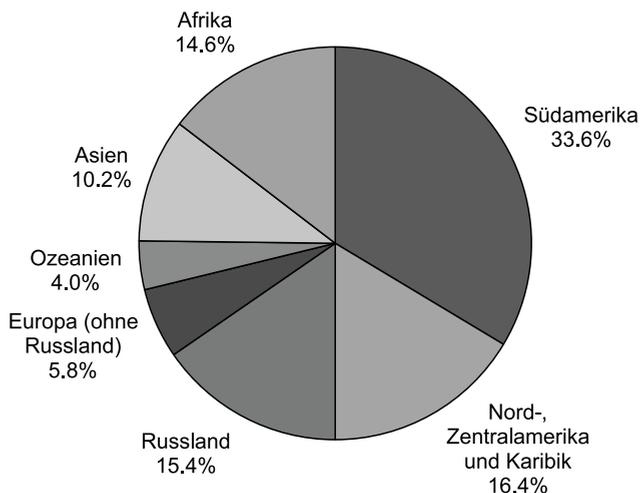


Bild 1.1 Territoriale Verteilung der in den Wäldern der Welt enthaltenen, stehenden Holzvorräte (nach (FAO, 2010))

Bezogen auf die Waldfläche der einzelnen Erdteile, errechnet sich Tabelle 1.2 zufolge für die Wälder der Erde ein durchschnittlicher Holzvorrat von 131 Fm, für die Wälder Europas hingegen ein durchschnittlicher Holzvorrat von 156 Fm je Hektar. Wird der Holzvorrat auf die Bevölkerungszahl bezogen, ergibt sich für jeden Bewohner der Erde ein Wert von 78 Fm und für jeden Einwohner Europas ein Wert von 52 Fm. Einer wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden, global gesehen, durchschnittlich 0,8 Fm je Hektar Waldfläche, in Europa dagegen 3,5 Fm je Hektar. Somit wird sowohl in Europa als auch weltweit weniger Holz wirtschaftlich genutzt als zuwächst, wobei allerdings bei dieser Betrachtung die Waldrodungen unberücksichtigt bleiben. Tabelle 1.3 zeigt die globale Bewaldung weltweit und nach Kontinenten sowie die Waldflächenänderungen zwischen 1990 und 2010 mit einem starken Rückgang in Afrika und Südamerika, dagegen erheblichen Zunahmen der Waldflächen in Europa und ab 2000 auch in Asien (besonders in China).

Tabelle 1.2 Waldflächen, Holzzuwachs und Holznutzung auf der Erde und in Europa (nach (FAO, 2010) und (Schmithüsen, et al., 2014))

Kenngröße	Erde	Europa (ohne Russland)
Gesamtfläche ohne Gewässer (10^6 ha)	13011	577
Waldfläche (10^6 ha)	4033	196
Waldflächenanteil (%)	31	34
Waldfläche pro Kopf der Bevölkerung (ha)	0,60	0,3
Waldfläche pro Kopf der Bevölkerung (Fm)	78	52
Holzvorrat je ha Waldfläche (Fm)	131	156
Jährlicher Zuwachs je ha Waldfläche (Fm)	1,0*	4,2
Jährliche Nutzung je ha Waldfläche (Fm)	0,8*	3,5
Holznutzung pro Kopf der Bevölkerung (Fm)	0,50	0,93

*geschätzt bezogen auf die globale Waldfläche

Tabelle 1.3 Globale Bewaldung (nach (FAO, 2010))

	Waldfläche	Anteil an weltweitem Wald	Anteil an Landfläche	Waldflächenänderung 1990/2000	Waldflächenänderung 2000/2010
	(1000 ha)	(%)	(%)	(1000 ha/Jahr)	(1000 ha/Jahr)
Afrika	674 419	16,7	23	-4067	-3414
Asien	592 512	14,7	19	-595	2235
Russland	809 090	20,1	49	32	-18
Europa (ohne Russland)	195 911	4,9	34	845	694
Nord-, Zentralamerika und Karibik	705 393	17,5	33	-289	-10
Südamerika	864 351	21,4	49	-4213	-3997
Ozeanien	191 384	4,7	23	-36	-700
Weltweit	4 033 060	100	31	-8323	-5210

Die ständige, nachhaltige Reproduktion in nach menschlichen Vorstellungen überschaubaren Zeiträumen ist einer der wesentlichen Vorzüge des Holzes gegenüber anderen mit ihm konkurrierenden Rohstoffen, wie z. B. Kohle, Erdöl oder Erdgas. Für die wirtschaftliche Nutzung des Holzes ist dabei wichtig, dass der Holz-, insbesondere der Schaftholzanteil an der Masse des lebenden Baums (Dendromasse) in Abhängigkeit von der Baumart mit dem Baumalter zunimmt. So haben wipfelschäftige, monopodial wachsende Baumarten, wie z. B. die Fichte, in Reinbeständen mittlerer Bonität im Alter von über 80 Jahren einen Schaftholzanteil von über 80%, während in Dickungen und Jungbeständen der Nadel- und Astanteil überwiegt (Bild 1.2).

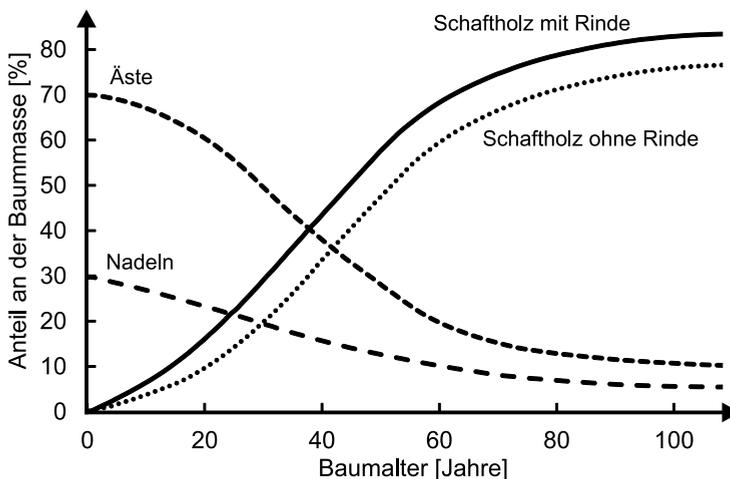


Bild 1.2 Anteil von Schaftholz, Ästen und Nadeln an der gesamten Baummasse von Fichte in Abhängigkeit vom Alter (Bloßfeld, Fiedler & Wienhaus, 1979)

Starkholz, was insbesondere im Alpenraum vorkommt, muss mit speziellen Technologien (Bandsägen) verarbeitet werden. Die großen Fortschritte in der Holzverarbeitung (Keilzinkung, Flächenverklebung, automatisierte Fehlererkennung und Holzsortierung) haben das Anforderungsprofil an das Holz jedoch zu schwächeren Sortimenten hin, welche kostengünstiger verarbeitbar sind als Starkholz, verschoben. Praktisch werden deshalb heute in Sägewerken bevorzugt relativ schwache Holzsortimente verarbeitet (Zerspanertechnologie).

In den letzten Jahren wird insbesondere aus Gründen der Biodiversität in Deutschland, Österreich und der Schweiz verstärkt Laubholz angebaut. Der Bestand an Laubholz im Wald steigt, der von Nadelholz sinkt. Heute wird dieses aus Kostengründen noch überwiegend energetisch genutzt. Der frühere Einsatz geringwertigerer Stammabschnitte für Eisenbahnschwellen ist stark reduziert. Erste Ansätze zum stärkeren Einsatz von Laubholz im Bauwesen sind vorhanden. Es gibt jedoch noch zahlreiche Probleme zu lösen.

Zum Vergleich wird Plantagenholz (insbesondere in Chile und Neuseeland) der Radiata-Kiefer nach etwa 20 Jahren für Sägeholz, nach etwa 7 Jahren für Zellstoff verwertet. Bei Eukalyptus sind die Umtriebszeiten noch geringer. Die Qualität wird dabei durch genetische, aber auch gezielte waldbauliche Maßnahmen (z.B. Astung, Pflanzungsdichte) beeinflusst. Selbst an der gezielten genetischen Veränderung des Cellulose- bzw. Ligninanteils der Bäume wird gearbeitet.

Physikalisch-mechanische Eigenschaften des Holzes

Holz ist ein anisotroper, inhomogener und poröser Werkstoff. Alle Holzeigenschaften sind richtungsabhängig, variieren sehr stark und sind abhängig von den Umweltbedingungen. Kenntnisse der mechanischen Eigenschaften (einschließlich Einfluss von Feuchte, Temperatur, des Langzeitverhaltens (rheologische Eigenschaften), der Alterung (von Holz, Verbindungsmitteln, Werkstoffen)) sind für den Holzeinsatz fundamental für die Nutzung des Holzes als Festkörper und seine Verarbeitung. Das beginnt mit der Kenntnis der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen und dem Wissen über die Variabilität der Holzeigenschaften.

Die Kenntnis der Holzeigenschaften ist sowohl wichtig für die Verarbeitung des Holzes (Zerspanung, Trocknung, Verklebung, Beschichtung), als auch für die Herstellung von Werkstoffen und Produkten (z. B. Wärmeübertragung, Ausrichtung der Strukturelemente, Einfluss technologischer Prozesse wie Trocknung, Wärmebehandlung und chemische Vergütung). Moderne Berechnungsmethoden wie Finite Elemente erfordern eine Vielzahl von Materialkennwerten und sind eine neue Herausforderung für die holzphysikalische Forschung. Komplette Datensätze sind bisher nur wenig verfügbar. Die in älterer Literatur oft nur aufgeführten Kennwerte E-Module bei Biegung und Biegefestigkeit oder Zug- und Druckfestigkeit in Faserrichtung sind nicht immer ausreichend. Zunehmend werden Parameter für die Berechnung der orthotropen Eigenschaften in den Hauptachsen sowie für plastische und viskoelastische Eigenschaften benötigt. Auch neuere Angaben zu Eigenschaften bei dynamischer Belastung fehlen weitgehend. Letztmalig wurden umfangreiche Arbeiten zur Mechanik in der Zeit um den 2. Weltkrieg durchgeführt, um insbesondere die erforderlichen Kennwerte für den damals starken Einsatz von Holz im Flugzeugbau zu erhalten. Seit Aufkommen der faserverstärkten Kunststoffe und dem starken Einsatz von Metallen ging die Bedeutung des Holzes im Flug- und Fahrzeugbau deutlich zurück. Heute ist die Tendenz zum Holzeinsatz wieder steigend. So werden Kunststoffe zunehmend mit

Naturfasern verstärkt, am Einsatz von Holz im Fahrzeugbau wird bereits gearbeitet. Auch die chemische und energetische Nutzung des Holzes spielt eine zunehmende Rolle.

Die Holzphysik ist heute in der Lage, mithilfe neuer Prüfverfahren den Kenntnisstand über physikalisch-mechanische Eigenschaften auf verschiedenen Strukturebenen deutlich zu verbessern. Moderne Messmethoden wie die Digital Image Correlation (Prinzip der Kreuzkorrelation, angewendet in der Photogrammetrie), die Computertomographie oder im Mikro- bzw. Nanobereich nutzbare Methoden wie Nanoindentation, Raman-Spektroskopie, AFM, NIR-Spektroskopie und viele weitere Verfahren geben dazu gute Möglichkeiten. Hinsichtlich der Materialkennwerte existieren vielfach noch große Lücken für FE-Berechnungen, besonders auch bezüglich der rheologischen und plastischen Eigenschaften, die es künftig zu schließen gilt.

Technologien zur Verarbeitung von Holz

Holz hatte in der bisherigen Menschheitsgeschichte eine große wirtschaftliche Bedeutung; es war Roh- und Werkstoff zugleich und wurde als Brenn- und Baumaterial, in der Frühzeit der Menschheitsentwicklung auch zur Herstellung von Werkzeugen vielseitig genutzt. Beim Übergang von der Stein- zur Bronze- und Eisenzeit erlangte Holz bzw. Holzkohle eine regelrechte Monopolstellung als Energieträger und Reduktionsmittel bei der Verhüttung von Erzen, die zumeist mit einer beträchtlichen Verwüstung der Wälder verbunden war.

Mit Beginn der industriellen Revolution wurde Holz ein vielbegehrter Industrierohstoff, ohne jedoch seine Bedeutung für den individuellen Verbrauch, z. B. als Brennmaterial, zu verlieren. So werden noch heute rund 50% des geernteten Holzes zur Energiegewinnung verbrannt; in einigen Entwicklungsländern ist Holz nach wie vor der wichtigste Brennstoff. Die Tendenz der energetischen Nutzung ist in den letzten Jahren auch in Europa wieder steigend, insbesondere bei Laubholz. Die Förderung der Verwendung nachwachsender Rohstoffe für die Energieerzeugung hat wesentlich dazu beigetragen (Hackschnitzelheizungen, Holzpellets). Sinnvoller wäre, besonders unter dem heute wichtigen Aspekt der CO₂-Reduzierung, die Eigenschaft von Holz als CO₂-Speicher auszuschöpfen und es erst als Altholz energetisch zu verwerten (Kaskadennutzung). Teilweise führt die vermehrte Verwendung von Holz als Brennstoff in der Holzwerkstoffindustrie bereits zu Versorgungsengpässen.

Auch an der Nutzung von Holz als Chemierohstoff wird weltweit intensiv gearbeitet. Neben der industriellen Erzeugung von Schnittholz, später von Sperrholz und Tischlerplatten wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit der Zellstoffherstellung begonnen, nachdem die chemischen Holzaufschlussverfahren einen entsprechenden Entwicklungsstand erreicht hatten. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts kamen die Herstellung von Faserplatten, um die Mitte des 20. Jahrhunderts die Herstellung von Spanplatten aus Holz hinzu, die in der Folgezeit in nahezu allen Industrieländern ein wirtschaftlich bedeutendes Ausmaß erreichten. Neben Span- und Faserplatten werden heute insbesondere Werkstoffe auf Massivholzbasis (Brettschichtholz, Brettsperrholz, Brettstapelelemente) im Bauwesen eingesetzt. Tabelle 1.4 gibt eine Übersicht zur Produktion von Industrie- und Brennholz weltweit von 1980 bis 2012. Der hohe Anteil an Brennholz ist deutlich erkennbar. Die Bruttowertschöpfung der Forst- und Holzwirtschaft betrug 2014 606 Mrd. US-Dollar. Tabelle 1.5 zeigt die Struktur der Bruttowertschöpfung einiger ausgewählter Länder.

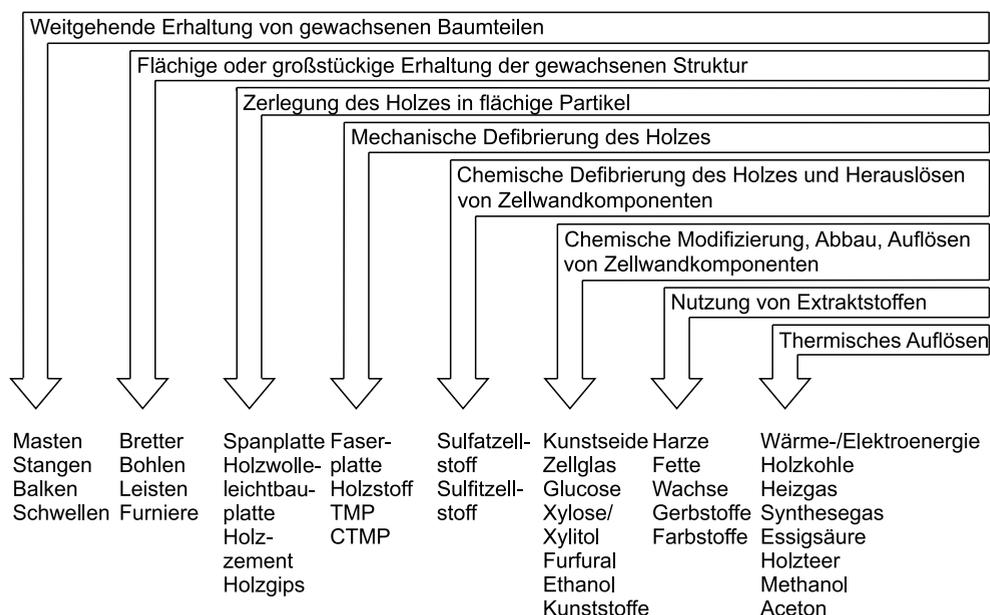
Tabelle 1.4 Produktion von Industrie- und Brennholz in der Welt in Mio. m³ (Bemmann, 2014)

Produkt	Jahr			
	1980	1990	2000	2012
Industrieholz	1446	1697	1622	1657
Brennholz	1681	1827	1810	1870
Gesamt	3127	3524	3432	3527

Tabelle 1.5 Bruttowertschöpfung der Forst- und Holzwirtschaft in Mrd. US-Dollar (Bemmann, 2014)

Land/Region	Rundholz	Holzbe- und -verarbeitung	Zellstoff und Papier	Gesamt
Weltweit				606
China	32,4	41,1	53,0	126
USA	20,3	22,1	53,3	96
Japan	2,0	9,2	28,8	40
Indien	28,1	0,4	2,5	31
Deutschland	3,0	9,2	13,9	26
Brasilien	7,0	5,8	9,7	22
Kanada	5,8	6,7	7,4	20

Bild 1.3 veranschaulicht die vielseitigen Möglichkeiten der Holznutzung, angefangen von der Schnittholzherstellung durch Aufteilen von gewachsenen Baumteilen bis zur Gewinnung chemischer Grundstoffe durch thermischen Abbau der Holzsubstanz.

**Bild 1.3** Technologie und Produkte der Holzverwertung (nach (Schulz & Wegener, 1983), verändert)

Demnach können heute fast alle aus fossilen Rohstoffen erzeugten Produkte auch aus Holz hergestellt werden, wenn es gelingt, die Produktivität der hochautomatisierten petrochemischen Produktionsanlagen zu erreichen. An dieser Thematik wird heute wissenschaftlich sehr intensiv gearbeitet. Ungeachtet dessen ist die industrielle Verarbeitung von Holz heute auf einem Stand, der die vielfachen Vorteile des Holzes gegenüber den mit ihm konkurrierenden fossilen Rohstoffen voll zur Geltung bringt. Die modernen Technologien zur Verarbeitung von Holz ermöglichen es, Produkte rationell und mit hoher Flexibilität herzustellen, ohne die Umwelt wesentlich zu belasten.

Holz als makromolekularer Verbund aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin mit spezifischen mechanisch-physikalischen Strukturmerkmalen lässt sich mit verhältnismäßig geringem Energieaufwand erzeugen (die notwendige Syntheseenergie wird durch das Sonnenlicht geliefert) und verarbeiten. Bei seiner Bildung wird Kohlendioxid der Atmosphäre chemisch gebunden, Sauerstoff dagegen in großen Mengen freigesetzt. Holz ist durch Kompostierung oder andere Rotteprozesse bzw. durch eine angepasste Verbrennung umweltschonend zu entsorgen. Aufgrund seines außerordentlich geringen Schwefel- und Stickstoffgehalts sowie seines geringen Aschegehalts entstehen bei der Verbrennung von Holz verhältnismäßig wenig Luftschadstoffe (Schwefeldioxid, Stickoxide) und Holzrückstände. Für recyceltes Holz und Holzwerkstoffe gelten besondere Regelungen wegen vorhandener Fremdstoffe wie Holzschutzmittel oder Klebstoffe. Diese sind in entsprechenden industriellen Anlagen zu verbrennen.

Große Mengen an Holz werden im Bauwesen eingesetzt. Insbesondere bei Massivbauweisen mit Massivholzplatten, Brettsperholz, Elementen in Brettstapelbauweise und Brett-schichtholz ist dies der Fall. Der Holzbau hat derzeit stark an Volumen insbesondere im innerstädtischen, mehrgeschossigen Wohnungsbau gewonnen. So werden derzeit in der Schweiz ca. 6% aller Mehrfamilienhäuser und 15 - 18% aller Einfamilienhäuser in Holz gebaut. Technologisch wurden in der Holzwerkstoffindustrie, der Möbelindustrie und dem Holzbau sehr große Fortschritte erzielt. CNC-gesteuerte Maschinen erlauben eine hochgenaue Fertigung auch in kleinen Stückzahlen. Dies gilt für die Möbelindustrie und den Holzbau. Die dadurch höhere Passgenauigkeit im Vergleich zu Beton ist heute schon vielfach ein Vorteil des Holzbaus. Viskosefasern auf Holzbasis haben bereits seit langem ein festes Marktsegment. Die chemische und energetische Nutzung des Holzes ist heute weltweit einer der großen Forschungsschwerpunkte. So wird auf den Gebieten der Nutzung von Nanocellulose, der chemischen Holzverwertung (Bioraffinerie) und der Nutzung von Holzinhaltsstoffen intensiv gearbeitet. Der steigende Anteil an Holz für die energetische Nutzung führte bereits zu Engpässen bei der stofflichen Verwendung. So werden in der Plattenindustrie bereits große Mengen an recyceltem Holz (in der Spanplattenindustrie 23,8% (Mantau, 2013)) verwendet, Tendenz steigend. In der Papierindustrie beträgt die Recyclingquote bereits 61%.

Um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, werden teilweise an einem Standort mehrere Mio. m³ Holz pro Jahr verarbeitet und Zellstoffwerke, Sägewerke, Holzwerkstoffbetriebe und Holzverarbeitungsbetriebe errichtet. So gibt es z. B. in Südchile Anlagen, die jährlich 5 Mio. m³ Plantagenholz verarbeiten. Synergieeffekte ergeben sich dabei hinsichtlich der Energie, aber auch der unterschiedlichen Holzqualitäten und der Nebenprodukte wie Späne, Hackschnitzel und Rinde.

Literaturverzeichnis

- Ando, K., Hirashima, Y., Sugihara, M., Hirao, S. & Sasaki, Y. (2006). Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique. *Journal of Wood Science*, 52 (6), S. 483 - 489.
- Bemmann, A. (2014). The Coming Age of Wood - Realität oder Fiktion. *Vortrag 13. Forstwissenschaftliche Tagung*, 17.9.2014. Tharandt.
- Bloßfeld, O., Fiedler, F. & Wienhaus, O. (1979). Charakterisierung und Verwertung von Hackgemischen aus der Ganzbaum- und Kronenhackung. In *Agrarwissenschaftliche Gesellschaft der DDR - Wissenschaftliche Tagungen 1979* (S. 4 - 17, 22).
- FAO. (2010). Global Forest Resources Assessment 2010 - Main Report. *FAO Forestry Paper 163*, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Goheen, D.W. (1981). Chemicals from wood and other biomass. PartI: Future supply of organic chemicals. *Journal of Chemical Education*, 58 (6), S. 465 - 468.
- Jensen, W. (1976). Versuche zur besseren Ausnutzung des Holzes in Finnland. In *Rohstoff Holz. - Sitzungsberichte der AdW der DDR, Nr. 4* (S. 5 - 27).
- Kurth, H. (1981). Der Roh- und Werkstoff Holz - Wissenschaftliche Grundlagen der nachhaltigen Produktion, verlustarmen Gewinnung und vollständigen Verwertung 19.1.1981. In *Material der 30. Plenartagung des Wiss. Rates der TU Dresden 19.1.1981*. TU Dresden: Selbstverlag.
- Langendorf, G. (1982). *Holz - Naturrohstoff mit Zukunft*. Leipzig: Fachbuchverlag.
- Mantau, U. (2013). Holzmarktlehre. *Vorlesungsunterlagen* Universität Hamburg.
- Paulitsch, M. (1989). *Moderne Holzwerkstoffe*. Berlin: Springer.
- Paulitsch, M. & Barbu, M.C. (2015). *Holzwerkstoffe der Moderne*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag.
- Schmithüsen, F., Kaiser, B., Schmidhauser, A., Mellinghoff, S., Perchthaler, K. & Kammerhofer, A. (2014). *Entrepreneurship and Management in Forestry and Wood Processing*. London and New York: Routledge, Taylor and Francis Group.
- Schulz, H. & Wegener, G. (1983). Die vielseitigen Möglichkeiten einer vollständigen Holzverwertung. *Allgemeine Forst Zeitschrift*, 38 (23), S. 578 - 581.
- Steinlin, H. (1979). Die Holzproduktion der Welt - Ökologische, soziale und ökonomische Aspekte. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 130 (2), S. 109 - 131.
- Thomasius, H. (1981). Produktivität und Stabilität von Waldökosystemen. In *Sitzungsberichte der AdW der DDR, Klassen Mathematik - Naturwissenschaften - Technik, Nr. 9* (S. 1 - 54).

2

Geschichte der Physik des Holzes

Die Physik des Holzes ist ein integraler Bestandteil der Wissenschaft vom Holz. Sie baut auf den Erkenntnissen der klassischen Physik, Mechanik und Festigkeitslehre auf, berücksichtigt aber auch den Wissensstand der Holzchemie, der Holzanatomie und Biologie. Unter der Physik des Holzes wird die „Lehre von den physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Holzes und der Holzwerkstoffe“ verstanden. Wichtige Arbeitsgebiete der Physik des Holzes sind:

- das Verhalten des Holzes gegenüber der Feuchtigkeit (Grundlagen der Feuchteaufnahme sowie des Quell- und Schwindverhaltens),
- der Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften des Holzes, die Wärmeleitung und die Wärmespeicherung und
- die mechanischen, rheologischen sowie akustischen Eigenschaften des Holzes und der Holzwerkstoffe.

Ferner befasst sich die Physik des Holzes mit der Theorie der Eigenschaftsbildung (Beziehungen zwischen Struktur und Eigenschaften) von Holz und Holzwerkstoffen sowie mit dem Wesen von Verformungs- und Bruchvorgängen.

Infolge des natürlichen Charakters des Holzes als biologisch erzeugter Rohstoff sind im Vergleich zu anderen Werkstoffen wie Stahl und Beton eine Reihe materialspezifischer Besonderheiten zu berücksichtigen. Als Beispiele seien hier nur die Inhomogenität, die Anisotropie sowie das hygroskopische Verhalten und der erhebliche Feuchteinfluss auf nahezu alle Eigenschaften genannt.

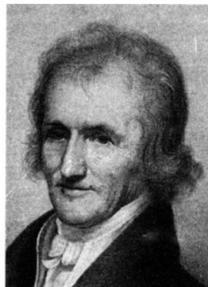
Die Kenntnis der mechanisch-physikalischen Eigenschaften ist eine wichtige Grundlage für die Herstellung von Schnittholz und Holzwerkstoffen, ihre Verarbeitung und den zweckmäßigen Einsatz. Aber auch die Entwicklung und der Einsatz moderner, rechnergestützt arbeitender Fertigungsanlagen erfordern umfassende Kenntnisse der physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Holzes und der Holzwerkstoffe.

Beispielsweise werden heute in wachsendem Maße physikalische Eigenschaften für die Automatisierung der Qualitätskontrolle genutzt. Man kann – sicherlich ohne Einschränkung – in den letzten Jahrzehnten von einer gewissen Renaissance der holzphysikalischen Forschung sprechen, die durch die Entwicklung von Prozessmesstechnik (insbesondere für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und zur Lokalisation von Fehlern) und durch die Anwendung moderner Prüftechnik (z.B. Schall- und Eigenfrequenzmessung, Lasertechnik, Röntgenstrahlung, Neutronenstrahlung, Fortschritte in der Schall-emission) und Berechnungsmethoden (z.B. Finite-Elemente-Methode, Theorien der Bruchmechanik) gefördert wird.

Erste Ansätze der wissenschaftlichen Erforschung der Eigenschaften des Holzes gehen u. a. auf Du Hamel du Monceau (1700 – 1782) und Leclerc de Buffon (1707 – 1788) zurück (Bild 2.1).



Du Hamel du Monceau
1700-1782



Cotta 1763-1844



G.L.Hartig 1764-1837



R.Hartig 1839-1901



Perkitny 1902-1986



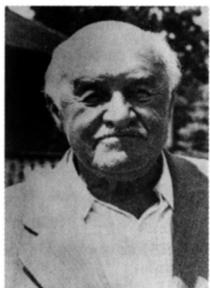
Flemming 1903-1963



Klauditz 1903-1963



E.Plath 1904-1978



Vorreiter 1904-1984



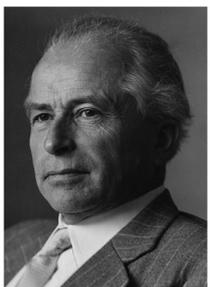
Kollmann 1906-1987



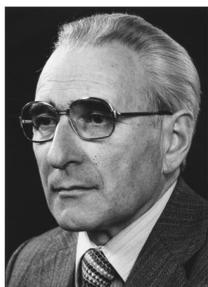
Trendelenburg 1907-1941



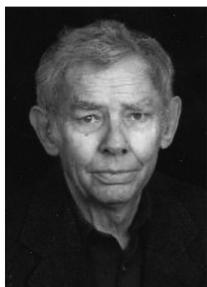
Keylwerth 1912-1969



Frey-Wyssling 1900-1988



Bosshard 1925-1996



Bodig 1934-2007



Ugolev 1925-2015

Bild 2.1 Portraits ausgewählter Wissenschaftler aus dem Bereich Forst und Holz

Aber auch schon weit früher wurden sehr viele grundlegende Arbeiten durchgeführt (Materialkennwerte, Dichtemessungen), was eine Recherche in alten Enzyklopädien beweist (Matejak & Niemz, 2011). Buffon erkannte als Erster die Korrelation zwischen Dichte und Festigkeit (Köstler, Kollmann & v. Massow, 1960).

Die Zeit von 1750 bis 1830 ist durch eine Flut von Arbeiten zur Holzproduktion und -nutzung gekennzeichnet. Hier sind insbesondere Arbeiten von Georg Ludwig Hartig (1764 – 1837) und Cotta (1763 – 1844) zu nennen. Dabei lag der Schwerpunkt auf den Festigkeitseigenschaften. Die diesbezügliche akademische Ausbildung an Universitäten reicht bis in diese Zeit zurück. Anfang des 19. Jahrhunderts wurden die ersten Hochschulen gegründet (z. B. Tharandt, Hannoversch-Münden). In Zürich gehörten bei der Gründung des damaligen Polytechnikums im Jahre 1855 (heute Eidgenössische Technische Hochschule (ETH)) Forstwissenschaften zu den Gründungsfakultäten. Später leistete A. Frey-Wyssling (1900 – 1988) an der ETH maßgebliche Beiträge zur Zellwandtheorie. Hans Heinrich Bosshard (1925 – 1996) prägte über viele Jahre insbesondere die holzatomische Forschung an der ETH. Unter seiner Leitung wurden aber auch viele holzphysikalische und holztechnische Aspekte bearbeitet. Auch entstand unter seiner Federführung ein dreibändiges Werk zur Holzkunde (Bosshard, 1982 – 1984).

Umfangreiche Arbeiten zur Erfassung der Eigenschaften setzten – insbesondere in Verbindung mit der Entwicklung der Prüftechnik – ab Mitte des 19. Jahrhunderts ein. Nägeli, der auch seine Wurzeln an der heutigen ETH in Zürich hatte, leistete durch die Entwicklung der Micelltheorie (1858) einen wesentlichen Beitrag zur Aufklärung des Quell- und Schwindverhaltens von Holz. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang auch eine von Volbehr (1896) erschienene Arbeit zu dieser Thematik. Nördlinger publizierte bereits 1860 umfangreiche Eigenschaften von Holz (Nördlinger, 1860).

Gleichfalls untersucht wurde in dieser Zeit die lineare Wärmeausdehnung des Holzes (Struwe, Glatzel, Villari), ohne allerdings das hygroskopische Verhalten des Holzes hinreichend zu berücksichtigen. Auf diesen Arbeiten aufbauend, konnte Karmarsch schon 1837 in seinem „Handbuch der mechanischen Technologie“ einen Überblick über die Eigenschaften und die Verarbeitung des Holzes geben (Karmarsch, 1851). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden u. a. von Janka (Köstler, Kollmann & v. Massow, 1960) umfangreiche Arbeiten zur Härte und Festigkeit des Holzes durchgeführt. Auf diese Weise sind also viele Mosaiksteine erarbeitet worden, eine „Wissenschaft vom Holz“ im eigentlichen Sinne existierte jedoch noch nicht. Das ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass es bis 1910 keine zielgerichtete Holzforschung in entsprechenden Forschungsinstituten gab. Sie war mehr oder weniger an die Forstwirtschaft angelehnt oder wurde von Nebenzweigen betrieben.

Die moderne Holzforschung setzte nach Köstler, Kollmann und von Massow im Jahre 1910 mit der Gründung des Forest Products Laboratory in Madison/Wisconsin in den USA ein (Köstler, Kollmann & v. Massow, 1960). Dem folgte die Gründung zahlreicher Holzforschungsinstitute in nahezu allen industrialisierten Staaten (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Übersicht über die in verschiedenen Ländern gegründeten Holzforschungsinstitute

Land	Jahr	Institut
Indien	1906	Forest Products Research Institute Dehradun
USA	1910	Forest Products Laboratory Madison/Wisconsin
Deutschland	1913	Institut für Holz- und Zellstoffchemie Eberswalde (ab 1934 Preußisches Holzforschungsinstitut, 1939 bis 1945 Reichsanstalt für Holzforschung)

Tabelle 2.1 Übersicht über die in verschiedenen Ländern gegründeten Holzforschungsinstitute (Fortsetzung)

Land	Jahr	Institut
Kanada	1913	Forest Products Laboratory Montreal (ab 1927 in Ottawa)
	1918	Forest Products Laboratory Vancouver (ab 2007: FPInnovations mit Sitz in Quebec und Vancouver)
Australien	1919	Forest Products Laboratory Melbourne
Großbritannien	1920	Forest Products Laboratory Princes Risborough
Russland	1932	Unions-Forschungs- und Projektierungsvereinigung „Sojusnautschdreprom“ Archangelsk (mit dem Forschungsinstitut für die mechanische Bearbeitung des Holzes (ZNIIMOD)), heute: Nautschdreprom-ZNIIMOD Archangelsk
Frankreich	1933	Institut National du Bois Paris
Finnland	1942	Laboratorium für Holztechnologie Helsinki
Schweiz	1943	Holzabteilung der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt Zürich (heute: Abteilung Angewandte Holzforschung, EMPA, Dübendorf)
Schweden	1944	Svenska Träforskningsinstitutet Stockholm
Deutschland	1946	Institut für Holzforschung des Vereins für technische Holzfragen e. V. Braunschweig (heute: Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI))
Slowakei	1947	Staatliches Holzforschungsinstitut Bratislava (existiert in dieser Form nicht mehr, Teil des Instituts für Papiertechnik)
Deutschland	1952	Institut für Holztechnologie und Faserbaustoffe Dresden (heute: Institut für Holztechnologie Dresden (IHD))
Polen	1952	Institut für Holzforschung Poznań
Österreich	1953	Österreichisches Holzforschungsinstitut Wien (heute: Holzforschung Austria)
Deutschland	1954	Institut für Holzforschung und Holztechnik an der Universität München, (heute: Holzforschung München (TU München))
	1954	Bundesanstalt für Holzforschung Reinbek bei Hamburg (heute: Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg)
Russland	1962	VNIIdrev (Unions-Forschungs- und Produktions-Vereinigung), dann zusätzlich 1971 „Sojusnautschplitprom“ Podreskowo (mit dem Forschungsinstitut Balabanowo), seit 1990: Projektierungsinstitut für Holzwerkstoffe „NIPKIDREVPLIT“ Podreskovo
Weltweit	seit etwa 1962	Gründung von Forschungsinstituten im Bereich Holzforschung an vielen Universitäten und zunehmend auch an Fachhochschulen (Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe der Universität für Bodenkultur in Tulln, Österreich; ENSTIB, Epinal, Frankreich; University of British Columbia, Vancouver/Kanada; Universität Laval/Kanada, University of Main/USA, Oregon State University, FH Biel/Schweiz, Forstakademie Peking, Forstliche Universitäten Peking, Nanjing, Kunming, Harbin/China u. a.). Auch in Japan (z. B. Universitäten in Nagoya und Kyoto) sind beachtliche Forschungskapazitäten vorhanden, ebenso in Südkorea, Neuseeland und Australien, Brasilien und Chile. Große Holzforschungsbereiche sind auch an den Universitäten in den ehemaligen osteuropäischen Staaten vorhanden (Polen, Ungarn, Tschechien, Slowakei, Rumänien, Bulgarien, Serbien, Slowenien, u. a.)

In Deutschland wurden 1932 ein Holzforschungsinstitut an der TH Darmstadt und 1934 das Preußische Holzforschungsinstitut in Eberswalde (später Reichsanstalt für Holzforschung unter der Leitung von Kollmann) gegründet. Erste zusammenfassende Kenntnisse der Wissenschaft vom Holz legten 1936 Kollmann (1906 – 1987) und 1939 Trendelenburg (1907 – 1941) in Buchform vor ((Kollmann, 1936), (Trendelenburg, 1939)). In diesem Zusammenhang muss auch das 1949 erschienene Werk von Vorreiter (1904 – 1984) genannt werden (Vorreiter, 1949). Kollmann leistete eine nahezu enzyklopädische Arbeit auf dem Gebiet der Holzforschung. Sein 1936 erstmalig erschienenenes Buch „Technologie des Holzes“ (in der zweiten, stark erweiterten Auflage unter dem Titel „Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe“, Band 1) stellt heute noch ein Standardwerk der Holzforschung dar (Kollmann, 1951). Es erschien später auch zusammen mit Côté in englischer Übersetzung (Kollmann & Côté Jr., 1968). Durch die Gründung von Holzforschungsinstituten, die Industrialisierung der Holzbe- und -verarbeitung, den erhöhten Einsatz des Holzes im Bauwesen und die Entwicklung von Holzwerkstoffen (Sperrholz ab 1900 in Deutschland, Faserplatten ab 1900 in England, Spanplatten ab 1940 in Deutschland) kam es zu einer wahren Flut von Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Holzphysik. Eine gute Einsicht gibt hier das Buch von Steinsiek (Steinsiek, 2008). Eine sehr gute Zusammenstellung des geschichtlichen Abrisses der Holznutzung vermittelt das Buch von Radkau „Holz – Wie ein Naturstoff Geschichte schreibt“ (Radkau, 2007).

Zu nennen sind auch die Impulse, die dieses Gebiet durch die Entwicklung der Flugzeugindustrie und den Einsatz von Holz in diesem Bereich erhielt (z. B. Ermittlung dynamischer Eigenschaften, Torsionsfestigkeit u. a.). Ab Mitte des 19. Jahrhunderts wurde Holzforschung auch verstärkt an Maschinenbau fakultäten von Hochschulen betrieben. Die Gründe liegen in der zunehmenden Holzverarbeitung und der Entwicklung von Maschinen und Anlagen für die Holzbe- und -verarbeitung. Hervorzuheben sind hier Arbeiten von Hartig und Sachsenberg an der TH Dresden (Hartig, 1885). Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden schwerpunktmäßig Forschungsarbeiten zur Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe (Keylwerth (1912 – 1969), Klauditz (1903 – 1963), Fahrni (1907 – 1970)) sowie zur mathematischen Beschreibung der Beziehungen zwischen Struktur und Eigenschaften von Holz durchgeführt (Plath (1904 – 1978), Flemming (1903 – 1966)). Die Erforschung dieser Gesetzmäßigkeiten der Strukturmechanik und des Bruchverhaltens erhielt insbesondere durch die Anwendung moderner Berechnungsmethoden (Finite-Elemente-Methode) wesentliche Impulse. Hierzu wurden insbesondere in den USA, Deutschland, Österreich und Schweden wesentliche Arbeiten durchgeführt (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2 Übersicht über ausgewählte Arbeiten zur Physik des Holzes

Jahr	Wissenschaftler	Forschungsgegenstand
18. Jhd.	Du Hamel du Monceau	Grundlagen der Forstnutzung
	Leclerc de Buffon	Festigkeitseigenschaften des Holzes
1848	Chevandier/Wertheim	Beziehung zwischen Feuchte und Rohdichte des Holzes
1850	Struwe	Messung der thermischen Ausdehnung von Holz
1882	Sachs/Hartig	Reindichtemessungen an Holz
1885 – 1895	Hartig	Beziehungen zwischen Jahrringbreite und Festigkeit des Holzes
		Einfluss der Verkernung auf die Feuchteaufnahme, Feuchteverteilung im Stamm

Tabelle 2.2 Übersicht über ausgewählte Arbeiten zur Physik des Holzes (*Fortsetzung*)

Jahr	Wissenschaftler	Forschungsgegenstand
1896	Volbehr	Arbeiten zum Quell- und Schwindungsverhalten des Holzes
1906/1907	Tiemann	Arbeiten zur Fasersättigungsfeuchte des Holzes
1907 – 1927	Stamm	Elektrische Eigenschaften des Holzes
1921	Hankinson	Herleitung der Formeln zum Einfluss der Faserrichtung auf die Festigkeit von Holz
1922	Baumann	Beziehung zwischen der Faserrichtung und Zugfestigkeit, Berechnung von Schubmoduln, Einfluss von Ästen auf die Festigkeit des Holzes
1923 – 1935	Hörig	Gleitzahlmessungen an Holz, E-Modul-Messungen
1924	Baumann/Bach	Einfluss der Schubverformung auf den E-Modul von Holz
1928	Huber	Schubmodulmessungen an Holz
ab 1930	Kraemer/Winter	Untersuchungen zur Festigkeit von Lagenholz
1932	Mörath	Härtemessung an Holz, Messung der dielektrischen Eigenschaften des Holzes
1934	Schmidt	Messung des logarithmischen Dekrements an Holz
1935	Roth	Untersuchungen zum rheologischen Verhalten von Holz
1938	Ivanov	Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Holz
1938	Nilakantan	Untersuchung der magnetischen Eigenschaften von Holz
1944	Kollmann/Dosoudil	Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen bei dynamischer Beanspruchung
1946	Weatherwax/Stamm	Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Holz
ab 1950	Perkitny/Raczkowski/Krauss	Untersuchungen zum Quelldruck
ab 1950	Klauditz/Kollmann/Keylwerth/Fahrni/Himmelheber/Fischer/Kehr/Scheibert/Plath	Untersuchung zu den mechanisch-physikalischen Eigenschaften von Spanplatten
ab 1958	Keylwerth/Flemming/Bodig/Jayne/Plath/Fahrni	Untersuchungen zur Strukturmechanik von Spanplatten
ab 1966	Burmester/Pellerin/James/Bucur/Ross	Untersuchung der akustischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen zum Zweck der Festigkeitsermittlung
ab 1968	Beall/Ansell/Landis/Niemz/Molinski	Schallemissionsmessungen an Holz zur Erforschung der Bruchmechanismen, Trocknungsspannungen u. a.
ab Anfang 1970	Funt/Bryant/Conners/James/Knuffel/Hirai/Fukada/Morén/Hansson	Verstärkte Erforschung holzphysikalischer Eigenschaften zum Zweck der Nutzung zur Qualitätskontrolle (optoelektronische, elektrische, akustische Eigenschaften, Röntgen, Lasertechnik)
ab 1980er Jahre	Martensson/Ranta-Maunus/Hunt/Morlier/Gresel/Niemz/Hanhijärvi	Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen, Mechanosorption

Tabelle 2.2 Übersicht über ausgewählte Arbeiten zur Physik des Holzes (*Fortsetzung*)

Jahr	Wissenschaftler	Forschungsgegenstand
ab 1990	Wienhaus/Niemz/ Meder/Tsuchikawa	Nutzung spektrometrischer Eigenschaften zur Qualitätskontrolle (Festigkeit, Klebstoffanteil etc.)
ab Mitte 2000	Salmen/Burgert/Navi/ Stanzl-Tschegg/Gindl/ Wimmer/Niemz	Mikromechanik (mechanische Tests), Nanoindentation, DMA, Raman-Spektroskopie, Röntgen-Kleinwinkelstreuung, AFM
ab etwa 2005	Bucur/Forsberg/Keun- ecke/Niemz/Mannes/ Van Acker/Kamke/ Teischinger	Röntgenmikro-Tomographie, Synchrotronstrahlung, In-situ-Belastungsversuche, Neutronen- und Röntgenstrahlung zur Messung der Feuchteverteilung und Feuchteänderung im Holz, Farbmessungen zur Holzcharakterisierung
ab etwa 2005	Harrington/Serrano/ Persson/Gustafsson/ Dai/Nairn/Svensson/ De Borst (Hofstetter)/ Navi/Gamstedt/Landis/ Carmeliet	Modellierung (Holzeigenschaften, Quellung, Holzwerkstoffe), Multi-Scale-Modeling

Bodig (1934 – 2007) und Jayne gaben in ihrem erstmalig 1982 erschienenen Buch „Mechanics of Wood and Wood Composites“ einen ersten geschlossenen Überblick über die Strukturmechanik des Holzes und der Holzwerkstoffe sowie die Bruchmechanik (Bodig & Jayne, 1982). Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang Arbeiten von Keylwerth (1958) und die seit Ende der 50er Jahre an der TU Dresden durchgeführten Untersuchungen (Fleming, Kusian, Niemz, Hänsel u. a.), die auf zahlreiche ungelöste Aufgaben hindeuten.

Als Zentren der Holzwerkstoffforschung sind ferner u. a. das Wilhelm-Klauditz-Institut Braunschweig (Klauditz, Kossatz, Marutzky, Kasal), das heutige IHD Dresden (Kehr, Scheibert) und das Forest Products Laboratory in Madison (USA) zu nennen. In den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden auch am heutigen Thünen-Institut in Hamburg zahlreiche Arbeiten zu Holzwerkstoffen durchgeführt (Modellierung, Heißpressen, Tomographie von Faserplatten, zerstörungsfreie Prüfung (Frühwald, Noack u. a.)).

Weitere Forschungsschwerpunkte der vergangenen Jahrzehnte sind:

- Die Erforschung der rheologischen Eigenschaften des Holzes (z. B. Roth (1935), Dinwoodie, Niemz (1982), Martensson, Ranta-Maunus, Hunt, Gressel (1972), Hanhijärvi (1995))
- Die Erforschung des Bruchverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen mittels Rasterelektronenmikroskopie und Schallemissionsanalyse (Beall, Niemz, Rosner, Kitayama, Nogouchi, Landis, u. a.)
- Die Erforschung holzphysikalischer Effekte zum Zweck der Fehler- und Qualitätsermittlung an Holz und Holzwerkstoffen (insbesondere in den USA und Japan: Kent, Bendtsen, Beall, James, Bulleit)
- Das Farbverhalten des Holzes (z. B. Teischinger)

Perkitny leistete in Polen grundlegende Arbeiten zur behinderten Quellung von Holz, die von Raczkowski fortgesetzt werden. Molnar (1944 – 2014) leistete in Ungarn eine sehr gute Arbeit und ist Autor zahlreicher Fachbücher. Ugolev (1925 – 2015) war in Russland bis ins hohe Alter aktiv im Bereich der Holzforschung tätig und war insbesondere im ehemaligen Ostblock einer der führenden Wissenschaftler auf dem Gebiet. Bis zuletzt arbei-

tete er am „shape memory effect“ des Holzes (Formgedächtniseffekt). Er schrieb zahlreiche Bücher zur Holzphysik und auch zur Geschichte der Holzforschung in Russland (Ugolev, 2014).

Wesentliche Beiträge zur Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe insgesamt wurden in den letzten Jahrzehnten auch von Holzforschern wie Noack, Schulz, Frühwald, Schwab, Wegener, Glos (Deutschland), Kisser, Neusser, Wassipaul, Resch, Teischinger (Österreich), Schniewind, Skaar, Siau, Nairn, Kamke, Landis, Rice, Ross (USA), Dinwoodie (Großbritannien), Perkitny, Razkowski, Krzysik und Matejak (Polen), Pozgaj (1939 – 1996), Babiak und Steller (Slowakei) erbracht, um nur einige zu nennen. Sie trugen dazu bei, dass die Physik des Holzes heute eine tragende Säule der Wissenschaft vom Holz ist. Viele Wissenschaftler auf dem Gebiet der Holzphysik sind gewählte Mitglieder der International Academy of Wood Science (IAWS).

Die holzphysikalische Forschung steht heute vor vielen Herausforderungen und noch ungelösten Fragen. Einige davon sollen nachstehend ohne Anspruch auf Vollständigkeit genannt werden:

- Die weitere Erforschung von Materialkennwerten als Basis für die Modellierung (Mechanosorption, Kriechen, Dauerstandfestigkeit, Ermüdung, Alterung, Feuchte- und Wärmetransport)
- Die Erforschung von Verformungen und Versagensvorgängen auf verschiedenen Strukturebenen von Holz, Holzwerkstoffen und Verklebungen
- Die Wechselwirkung von Holz mit Klebstoffen und Beschichtungsmaterialien
- Die Modifizierung und Funktionalisierung des Holzes

Moderne holzphysikalische Forschung erfordert heute eine Teamarbeit von Experten unterschiedlicher Fachrichtungen (z. B. Holzwissenschaft, Physik, Geophysik, Mechanik, Materialwissenschaften, Chemie). Erst dadurch können Methoden wie die Computertomographie im Synchrotron, die Röntgen-Mikrotomographie oder die Neutronentomographie, die Wellenausbreitung in Holz u. a. erfolgreich angewandt werden. Die Fortschritte in der Mess- und Rechentechnik ermöglichen es mehr und mehr, Versagensvorgänge in situ in 2D oder auch 3D zu erfassen. Zahlreiche Fragestellungen kommen zudem aus der Praxis.

Literaturverzeichnis

- Bodig, J. & Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites* (1. Ausg.). New York: Van Nostrand Reinhold.
- Bosshard, H. H. (1982 – 1984). *Holzkunde I – III* (2. Ausg.). Basel: Birkhäuser.
- Hartig, R. (1885). *Das Holz der deutschen Nadelbäume*. Berlin: Springer.
- Karmarsch, K. (1851). *Handbuch der mechanischen Technologie*. Hannover: Hellwingsche Hofbuchhandlung.
- Kisser, J. G., Ylinen, A., Freudenberg, K., Kollmann, F. F., Liese, W., Thunell, B., et al. (1967). History of wood science. *Wood Science and Technology*, 1 (3), S. 161 – 190.
- Kollmann, F. (1936). *Technologie des Holzes*. Berlin: Springer.
- Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe* (2. Ausg., Bd. 1). Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer.
- Kollmann, F. & Côté Jr., W. A. (1968). *Principles of wood science and technology* (Bd. 1). Berlin/Heidelberg: Springer.

- Kossatz, G. (1977). Holzforschung für den Markt von heute und morgen. *Holz-Zentralblatt*, 103, S. 10, 399, 453, 621.
- Köstler, J.N., Kollmann, F. & v. Massow, V. (1960). *Denkschrift zur Lage der Forstwirtschaft und Holzfor-*
schung. Wiesbaden: Steiner.
- Matejak, M & Niemz, P. (2011). *Das Holz in deutschen Texten zwischen 1587 und 1922*. Zürich: ETH Zürich,
Institut für Baustoffe, Holzphysik (online auf e-collection der ETH Bibliothek).
- Nördlinger, H. (1860). *Die technischen Eigenschaften der Hölzer*. Stuttgart: Cottascher Verlag.
- Radkau, J. (2007). *Holz - Wie ein Naturstoff Geschichte schreibt*. München: oecom Verlag.
- Scamoni, A. (1960). Die Entwicklung der forstlichen Lehre und Forschung in Berlin und Eberswalde. *Forst*
und Jagd, 10 (11), S. 536 - 539.
- Steinsiek, M.P. (2008). *Forst- und Holzforschung im „Dritten Reich“*. Remhagen: Verlag Kessel.
- Trendelenburg, R. (1939). *Das Holz als Rohstoff*. München: Hanser.
- Ugolev, B. (2014). *Historische Meilensteine der Holzforschung in Russland und Blick in die Zukunft*. Moskau:
Moskauer Forsttechnische Universität (Eigenverlag, in Russisch).
- Vorreiter, L. (1949). *Holztechnologisches Handbuch* (Bd. 1). Wien: Fromme.

3

Übersicht zu physikalischen Eigenschaften des Holzes und wichtigen Einflussfaktoren

In der Fachliteratur werden die Eigenschaften des Holzes meistens in

- physikalische (z. B. Dichte, Feuchtegehalt, Reibungseigenschaften) sowie
- mechanische und Festigkeitseigenschaften eingeteilt.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird es jedoch als zweckmäßig erachtet, eine Einteilung der Eigenschaften des Holzes, wie in Bild 3.1 dargestellt, vorzunehmen (die mechanischen und Festigkeitseigenschaften sind darin den physikalischen Eigenschaften zugeordnet). Dabei wird von Holz als Festkörper ausgegangen, dessen Eigenschaften durch die chemische Struktur, den Zellwandaufbau, die Wabenstruktur, die Orthotropie (Richtungsabhängigkeit) sowie Sondermerkmale wie Äste bestimmt werden. Je nach Eigenschaften sind dabei der chemische Aufbau, der anatomische Aufbau (Holzart, Wabenstruktur, Zellwandaufbau etc.) oder die Orthotropie entscheidend für die Eigenschaften. So ist z. B. beim Sorptionsverhalten und bei der Pilzresistenz die chemische Struktur (z. B. Inhaltsstoffe) wichtig. Heute werden zunehmend komplexe Beschreibungen der Eigenschaften unter Kombination der chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften verwendet. So können mechanische, aber auch biologische Eigenschaften bereits über komplexe chemische Analysen abgeschätzt und mit diesen Eigenschaften korreliert werden (siehe Kap. 11).

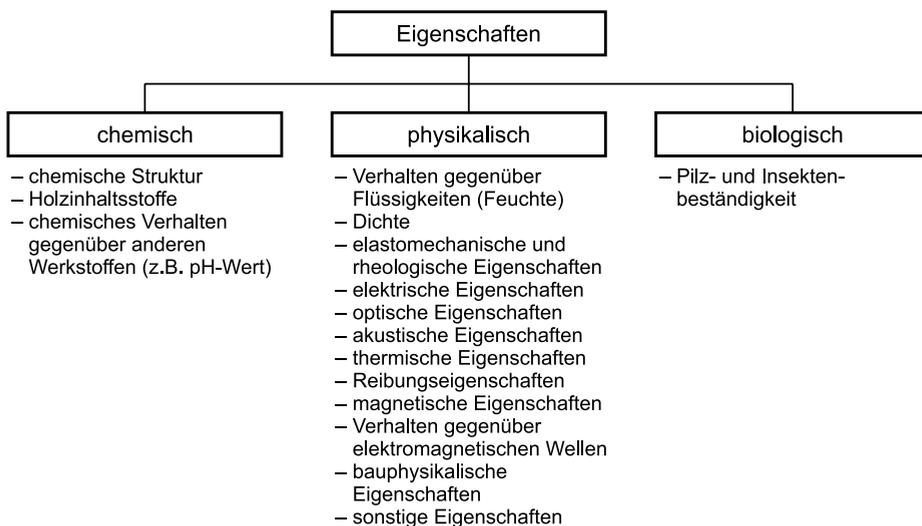


Bild 3.1 Systematik der Eigenschaften von Vollholz und Holzwerkstoffen

Die biologischen und chemischen Eigenschaften werden in anderen Fachbüchern zur Thematik beschrieben (Wagenführ, 1999) (Fengel & Wegener, 1984) (Langendorf, Schuster & Wagenführ, 1990). Soweit erforderlich, erfolgt eine kurze Interpretation der für diesen Band wichtigen Sachverhalte.

Sämtliche Ausführungen beziehen sich weitgehend auf Holz im natürlichen Zustand, also auf Voll- oder Massivholz, und, soweit Angaben dazu vorhanden sind, auch auf Holzwerkstoffe.

Während Voll- oder Massivholz definitionsgemäß durch entsprechende Trennschnitte (Längs- und Querschnitte) aus Rohholz hergestellt wird, ohne dessen strukturellen Aufbau zu verändern, werden Holzwerkstoffe in Form von Vollholzwerkstoffen (Brettschichtholz, Massivholzplatten), Lagenholz, Verbundplatten, Span- und Faserplatten bzw. -formteilen aus Strukturelementen des Holzes erzeugt, die zuvor in gezielter Weise aus Roh- oder Vollholz hergestellt worden sind. Dabei werden in der Regel Kleb- und Zusatzstoffe (neuerdings bei Massivholzwerkstoffen auch mechanische Verbindungsmittel wie Nägel, Dübel, klassische Holzverbindungen (Nut-Feder, Schwalbenschwanz u. a.)) eingesetzt, um die Strukturelemente miteinander zu verbinden und bestimmte (vorgegebene) Werkstoffeigenschaften zu erzielen. Werkstoffe sind insofern ein Mehrkomponentenmaterial, bei dem die Struktur des natürlichen Holzmaterials zum Zwecke der Eigenschaftsveränderung gezielt variiert wird.

Alle Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen unterliegen vielfältigen Einflüssen, die ihr Niveau mehr oder weniger bestimmen. Die wichtigsten sind:

- der strukturelle Aufbau des Holzes (z. B. Rohdichte, Faser-Last-Winkel, Schnittrichtung bei Vollholz; Rohdichte, Festharzanteil, Spanlänge bei Spanplatten),
- die Vorgeschichte des Holzes (z. B. Alterung (insbesondere bei Holzwerkstoffen ist dabei ein deutlicher Einfluss der Klebstoffart vorhanden: Harnstoffharze gelten als nicht feuchtebeständig, Phenolharze, Melaminharze und PMDI sind feuchtebeständig), Korrosion, Pilz- und Insektenbefall),
- die Prüfmethodik (z. B. Verhältnis von Stützweite zu Probendicke bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls, Prüfkörpergeometrie, Belastungsart) und
- die Umweltbedingungen (z. B. relative Luftfeuchte, Temperatur).

Alle diese Faktoren sind sowohl bei der Prüfung als auch bei der Entwicklung von Prüfmethoden zu berücksichtigen, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Bild 3.2 enthält eine Aufstellung der wichtigsten Einflussfaktoren, die in den folgenden Ausführungen behandelt werden. Eine weitere Erläuterung wesentlicher Einflussfaktoren erfolgt in den Kapiteln 13 und 14.

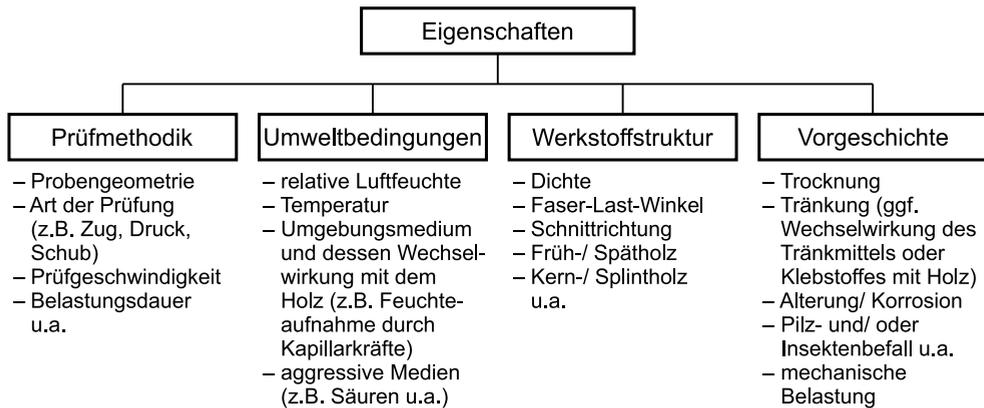


Bild 3.2 Systematik der Einflussfaktoren von Vollholz und Holzwerkstoffen

Dominierende Einflussfaktoren sind im Allgemeinen:

- die Struktur des Holzes in den verschiedenen Ebenen (z. B. Rohdichte, Schnitttrichtung, Faser-Last-Winkel),
- der Feuchtegehalt des Holzes und
- die Vorgeschichte des Holzes (z. B. Alterung von Holzwerkstoffen durch Hydrolyse der Klebfugen, zyklische Belastung durch feuchteinduzierte Spannungen oder Rissbildung durch Quell- und Schwindverhalten).

Literaturverzeichnis

- Fengel, D. & Wegener, G. (1984). *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin/New York: De Gruyter.
- Langendorf, G., Schuster, E. & Wagenführ, R. (1990). *Rohholz* (4. Ausg.). Leipzig: Fachbuchverlag.
- Wagenführ, R. (1999). *Anatomie des Holzes* (5. Ausg.). Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag.

4

Struktur und Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen

■ 4.1 Vorbemerkungen

Die Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen werden wesentlich durch den strukturellen Aufbau im makroskopischen, mikroskopischen und submikroskopischen Bereich bestimmt. Korrelationen bestehen nach neueren Arbeiten auch zwischen der chemischen Struktur und den mechanisch-physikalischen Eigenschaften sowie der Pilzresistenz (Thumm & Meder, 2001). Bei Holzwerkstoffen können durch Veränderung der Struktur die Eigenschaften in einem weiten Bereich variiert werden (Dunky & Niemz, 2002).

Die Erforschung des Einflusses der Holz- bzw. Holzwerkstoffstruktur ist seit langem Gegenstand der Holzforschung. Dabei wurde jedoch schwerpunktmäßig Wert auf die Untersuchung einzelner, die Eigenschaften wesentlich bestimmender Strukturparameter gelegt. Eine geschlossene Darstellung, die Ableitung allgemeingültiger Zusammenhänge und die mathematische Durchdringung der Gesetzmäßigkeiten sind dagegen selten. Beachtet werden muss, dass bei Holz infolge seines extrem anisotropen und inhomogenen Aufbaus sowie von wuchs- und standortbedingten Einflüssen die Eigenschaften weitaus schwerer berechenbar sind als bei Materialien wie Stahl oder auch einem glasfaserverstärkten Kunststoff. Um allgemeingültige Zusammenhänge in Form von Tendenzen darzustellen, wird nachfolgend eine Systematisierung der strukturmechanischen Gesetzmäßigkeiten von Holz und Holzwerkstoffen vorgenommen. Damit soll ein Überblick über die Wechselwirkung zwischen Struktur und Eigenschaften gegeben und die Komplexität der Wechselwirkung zwischen Struktur und Eigenschaften sichtbar gemacht werden. Je nach Grad der Erforschung des Zusammenhanges zwischen Struktur und Eigenschaften werden die weiteren Ausführungen auf die wesentlichen Größen begrenzt.

Bezüglich der Berechnung der Eigenschaften von Holzwerkstoffen wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (Gereke T., 2009) (Gereke, et al., 2012). Insbesondere zahlreiche auf FE-Theorien basierende Arbeiten entstanden in den letzten Jahren, die sowohl eine Modellierung von Vollholz (mechanische Eigenschaften, Quellung) als auch von Holzwerkstoffen zum Gegenstand haben. Für Sperrholz und auch Brettsperrholz (Massivholzplatten) existieren bereits Normen. In Kapitel 19 sind ausgewählte Eigenschaften von Vollholz und Holzwerkstoffen als Übersicht zusammengestellt.

■ 4.2 Einteilung von Holz und Holzwerkstoffen

Holz und Holzwerkstoffe lassen sich unter Berücksichtigung ihres strukturellen Aufbaus gliedern und unterteilen (Bilder 4.1 bis 4.8). Dabei wird generell zwischen Vollholz und Holzwerkstoffen unterschieden (Bild 4.1). Eine Übersicht zur Normung ist in Kapitel 20 aufgeführt. Nicht berücksichtigt sind WPC (Wood-Plastic-Composites). Dabei handelt es sich um mit Holz- oder anderen Naturfasern verstärkte Kunststoffe, wobei der Holzanteil meist zwischen 50 – 90% beträgt. Die Materialien werden mit in der Kunststoffverarbeitung üblicher Technologie verarbeitet (Spritzguss, Extrudieren u. a.) (Hänsel A., 2012).

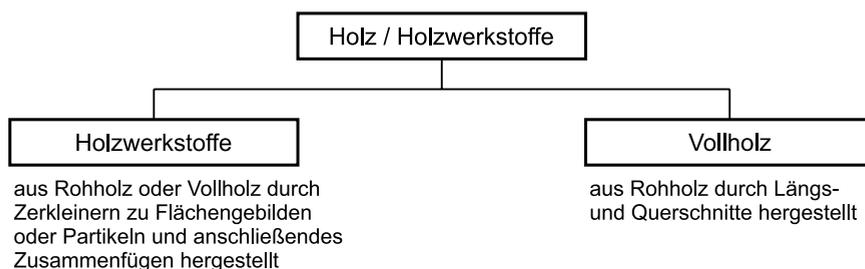


Bild 4.1 Einteilung von Holz und Holzwerkstoffen nach strukturellen Bauprinzipien

4.2.1 Holz

Da Holz in aller Regel durch Längs- und Querschnitte aufgeteilt wird, ist es, streng genommen im Sinne der Definition, immer Vollholz. Bei Vollholz wird, wie aus Bild 4.2 hervorgeht, zwischen unvergütetem und vergütetem Vollholz unterschieden.

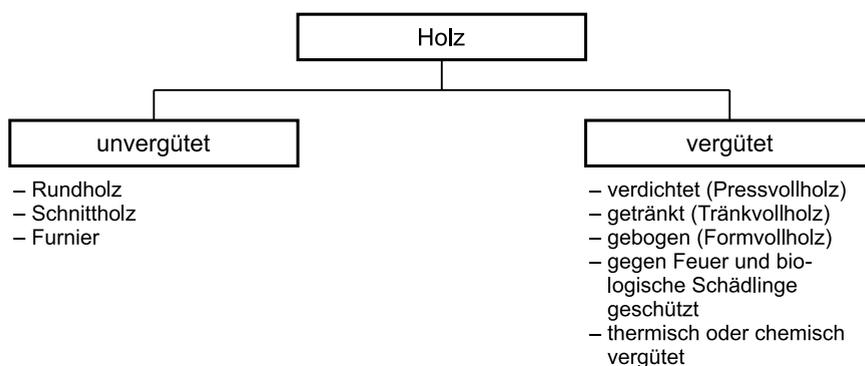


Bild 4.2 Einteilung von Vollholz

Unvergütetes Vollholz ist Vollholz, das nicht vorbehandelt ist, aber klimatisiert und getrocknet sein kann. Zu dieser Werkstoffkategorie zählen Rundholz, Schnittholz und Furnier.

Als vergütetes Vollholz bezeichnet man Vollholz, dessen natürliche Eigenschaften durch eine entsprechende Behandlung, ausgenommen Trocknen und Klimatisieren, zielgerichtet verändert worden sind. So kann z. B. durch Einlagerung von Kunstharzen, Wärmebehandlung, Acetylierung oder andere chemische Vergütungsverfahren und/oder Verdichtung eine Struktur- und damit eine Eigenschaftsänderung erreicht werden. Im Folgenden wird, da der Begriff Vollholz nicht überall geläufig ist oder nur werkstück- bzw. produktbezogen angewandt wird, generell von Holz gesprochen, wenn es sich um Vollholz in natürlichem Zustand handelt.

4.2.2 Holzwerkstoffe

Bild 4.3 zeigt eine Einteilung der Holzwerkstoffe nach ihrem strukturellen Aufbau. Charakteristisch für Holzwerkstoffe ist, dass mit zunehmender Zerkleinerung des nativen Holzes eine weitgehende Homogenisierung der Eigenschaften der aus den Strukturelementen hergestellten Werkstoffe erfolgt.

Innerhalb der einzelnen Werkstoffgruppen können die Werkstoffeigenschaften durch Veränderung der Eigenschaften der Stoffkomponenten sowie ihrer Gestalt und Anordnung variiert werden. So wird z. B. durch die Bindemittelart die Witterungsbeständigkeit eines Holzwerkstoffs stark beeinflusst. Während harnstoffharzverleimte Spanplatten nur für Räume mit niedriger relativer Luftfeuchte der Nutzungsklasse 1 (Trockenbereich) geeignet sind (ehemals Typ V 20 nach DIN 68763), werden melaminharzverleimte, PMDI-verleimte und teilweise auch noch phenolharzverleimte Spanplatten (ehemals Typ V 100 bzw. V 100 G nach DIN 68763, heute Nutzungsklasse 2 (Feuchtbereich nach DIN EN 1995-1-1)) als begrenzt witterungsbeständig eingestuft. Für Nutzungsklasse 3 (Außenbereich) sind Holzwerkstoffe auf Span- oder Faserbasis in der Regel nicht zugelassen. Der Einsatz von Zement als Bindemittel erlaubt jedoch die unbeschränkte Verwendung von Spanplatten im Außenbereich. Gips ist als Bindemittel für Partikelwerkstoffe im Einsatz. Brettschichtholz wird überwiegend mit feuchtebeständigen Klebstoffen (MUF/MF, PRF, 1 K-PUR, teilweise EPI) verklebt. Bei Massivholzplatten kommen je nach Verwendungszweck verschiedene Klebstoffsysteme zum Einsatz.

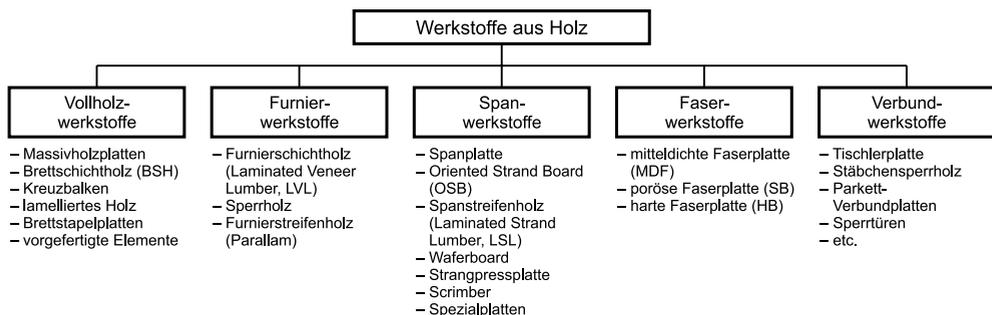


Bild 4.3 Einteilung von Werkstoffen aus Holz

4.2.2.1 Werkstoffe auf Vollholzbasis

Vollholzwerkstoffe sind als Platten, stabförmige Elemente und Verbundelemente im Einsatz. In Bild 4.4 zeigt eine Einteilung Werkstoffe auf Vollholzbasis.

Platten

Plattenwerkstoffe auf Vollholzbasis, insbesondere Massivholzplatten, auch als Brettspertholz bezeichnet, gewinnen seit Ende der 80er Jahre zunehmend an Bedeutung. Es werden ein- und mehrschichtige Platten gefertigt. Die Verbindung der Lagen erfolgt durch Verklebung, Nägel oder auch Dübel und teils auch mittels klassischer Holzverbindungen wie Gratleisten. Meist wird Nadelholz, vereinzelt auch Laubholz eingesetzt. Bei mehrschichtigen Platten größerer Dicke werden oft die Mittellagen genutet bzw. die Bretter der Mittellagen unverklebt eingelegt, um Spannungen bei Feuchteänderungen zu reduzieren.

Derzeit ist eines der wichtigsten Einsatzgebiete das Bauwesen. Mehrschichtige Platten werden insbesondere als Wand- und Deckenelemente, teilweise auch als Fahrbahnplatten eingesetzt. Großformatige Platten werden vorgefertigt und mit CNC-Maschinen hochpräzise bearbeitet. Massivholzplatten werden bei Belastung parallel zur Plattenebene teilweise analog wie Brettschichtholz verwendet. Durch die senkrecht orientierten Lagen wird dabei eine im Vergleich zu Brettschichtholz erhöhte Querkzugfestigkeit erreicht.

Ein Spezialprodukt sind Brettstapelelemente (stehende Lamellen, verbunden durch Verkleben, Dübel aus Laubholz oder auch Nägel). Im Deckenbereich werden diese oft in Verbindung mit Betonauflagen (Kraftübertragung über Schrauben) verwendet.

Den plattenförmigen Vollholzwerkstoffen hinzuzurechnen sind auch die sog. Leimholzplatten, die durch Querverleimen von ausgesuchten Brettern oder Leisten hergestellt werden und im Möbelbau z. B. für Massivholzfronten eingesetzt werden.



Bild 4.4 Werkstoffe auf Vollholzbasis

Brettschichtholz/lamelliertes Holz

Brettschichtholz bzw. lamelliertes Holz ist ein Werkstoff, der aus faserparallel miteinander verklebten Brettern oder Leisten besteht. Dieser Werkstoff wird zumeist in Dimensionen hergestellt, die sich aus dem vorgesehenen Einsatzzweck ergeben, im Bauwesen z. B. für Dachbinder. Dabei werden zur Erhöhung der Tragfähigkeit ggf. Spannelemente (Vorspannen) verwendet, teilweise erfolgt eine Verstärkung in den Randbereichen (z. B. mit Kohlefasern). Durch das Lamellieren wird im Durchschnitt eine Erhöhung der Festigkeit gegenüber nativem Holz um rund 10% erreicht, die Streuung der Eigenschaften sinkt dabei beträchtlich. Bei Brettschichtholz erfolgt zunehmend eine (maschinelle) Sortierung des

Holzes nach den mechanischen Kennwerten in Festigkeitsklassen (DIN EN 338, DIN EN 14080), dadurch kann die Tragfähigkeit deutlich erhöht werden. Teilweise werden auch hybride Systeme aus Nadel- und Laubholz verwendet, um eine selektive Verstärkung beispielsweise der Zugzonen oder der Auflagerbereiche vorzunehmen.

Lamelliertes Holz wird in wachsendem Umfang auch für die Herstellung von Fenstern und Türen eingesetzt, weil es sich gegenüber massiven Querschnitten durch ein besseres Stehvermögen auszeichnet.

Verbundelemente

Bei größeren Querschnitten werden Verbundelemente mit Hohlräumen (teils auch mit Sand oder Dämmstoff zur Schall- oder Wärmedämmung gefüllt) verwendet.

4.2.2.2 Lagenholz/Furnierwerkstoffe

Die Terminologie und Klassifizierung der Lagenhölzer erfolgt nach DIN EN 313-1 und 313-2. Lagenholz ist ein Werkstoff, der aus symmetrisch übereinander geschichteten und miteinander verklebten Furnierlagen besteht. Zu dieser Werkstoffgruppe gehören auch vergütete Lagenhölzer wie kunstharz imprägniertes Lagenholz, verdichtetes Lagenholz sowie Furnierschichtholz (Laminated Veneer Lumber, LVL), das aus faserparallelen Furnieren hergestellt und teilweise außer als Platten auch wie Brettschichtholz zu Balken verarbeitet wird. Teilweise werden einzelne Lagen quer orientiert zwecks Erhöhung der Tragfähigkeit senkrecht zur Faserrichtung und Reduzierung der Quellung senkrecht zur Faserrichtung. Furnierschichtholz ist aus Nadelholz (z. B. Kerto-Schichtholz) sowie Buche als Baubuche, auf dem Markt verfügbar.

Gleichfalls in diese Gruppe einzuordnen ist der als „Parallam“ (Parallel Strand Lumber) bezeichnete, stabförmige Werkstoff aus Schäl furnierstreifen. Tischlerplatten (Stabsperrholz, Stäbchensperrholz) sind dem Sperrholz zugeordnet. Diese werden im vorliegenden Buch zu den Verbundplatten gezählt. Bild 4.5 zeigt eine entsprechende Einteilung des Lagenholzes.

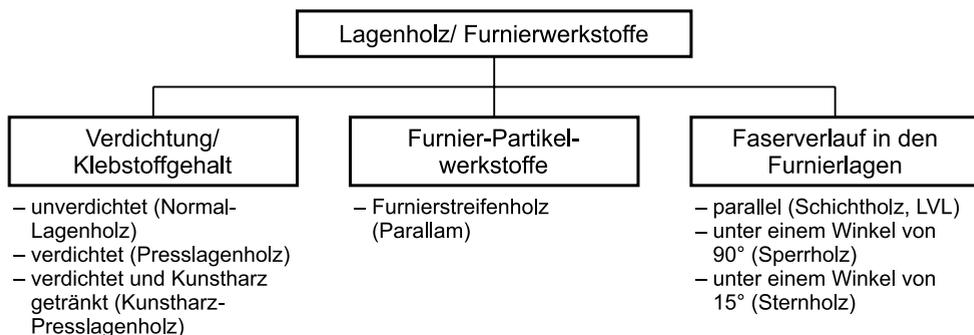


Bild 4.5 Einteilung von Werkstoffen auf Furnierbasis

4.2.2.3 Spanwerkstoffe

Spanplatten sind plattenförmige Werkstoffe, die aus spanförmigen Partikeln, vorwiegend Holzpartikeln, bestehen und mit Klebstoff oder anderen Bindemitteln sowie Zusatzstoffen mit oder ohne Druck meist unter Einwirkung von Wärme hergestellt worden sind. Bild 4.6 zeigt eine Einteilung der Spanplatten.

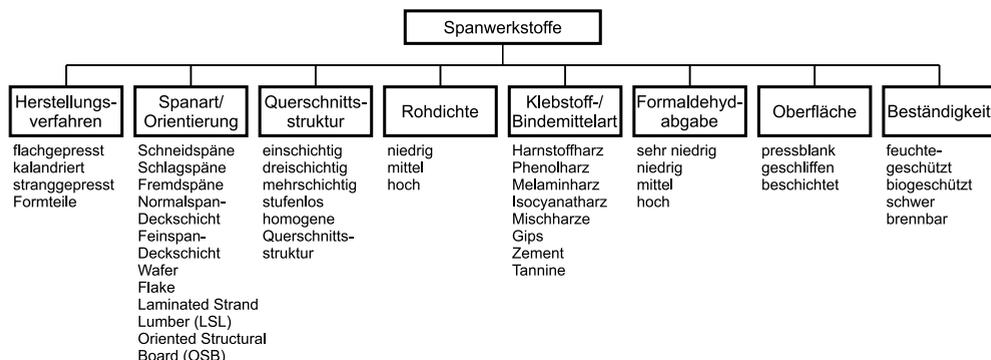


Bild 4.6 Einteilung von Spanwerkstoffen

Als Spezialsortimente von Spanplatten haben u. a. OSB (Oriented Strand Board, Partikel-
länge etwa 70 mm), die eine erhöhte Festigkeit in Orientierungsrichtung der Späne haben,
und Waferboard – aus großflächigen Spänen gefertigte Spanplatten, die insbesondere in
den USA im Bauwesen als Sperrholzersatz breite Anwendung finden – eine größere Be-
deutung erlangt (Eigenschaften siehe Kapitel 19). Eine Weiterentwicklung von OSB sind
LSL (Laminated Strand Lumber) mit einer Partikellänge von 300 mm. Ein gleichfalls aus
den USA stammender Spezialwerkstoff ist „Structureframe“, der besonders für hochbelas-
tete Möbelteile, wie z. B. Zargen in Gestell- und Polstermöbeln, entwickelt worden ist.

Scrimber bestehen aus extrem langen Partikeln, die durch Zerquetschen von Dünnschicht
zwischen einem Rollenpaar hergestellt und zu größeren Querschnitten verklebt werden.
Durch das Quetschen wird die faserparallele Ausrichtung der Strukturelemente weitge-
hend beibehalten, beim spanenden Aufteilen wird dagegen meist der Faser-Lastwinkel
leicht angeschnitten und dadurch die Festigkeit etwas reduziert. Durch diesen Effekt ist
auch die Festigkeit von Brettern etwa um 10% geringer als die von Rundholz.

Eine Besonderheit sind Spanformteile. Diese werden mit im Vergleich zu Spanplatten er-
höhtem Klebstoffanteil (10 – 30%) gefertigt und mit imprägnierten Folien allseitig be-
schichtet. Teilweise werden auch Paletten nach dem Verfahren gefertigt (Firma Werz) (Au-
torenkollektiv, 1990).

4.2.2.4 Faserwerkstoffe

Faserplatten sind plattenförmige Werkstoffe, die aus faserartigen Partikeln, vorwiegend
Holzpartikeln, bestehen und mit oder ohne Druck, mit oder ohne Kleb- sowie Zusatzstoffe(n)
unter Einwirkung von Wärme hergestellt worden sind. Klebstofffrei kann bisher nur im
Nassverfahren gearbeitet werden. Der Rohdichtebereich reicht von 50 kg/m³ (Dämmstoffe
im Trockenverfahren) bis über 1000 kg/m³ (HDF, Laminatboden, harte Faserplatten im

Nassverfahren). Auf Basis von Fasern aus Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen werden auch Formteile für den Fahrzeugbau gefertigt. Bild 4.7 zeigt eine Einteilung der Faserplatten.

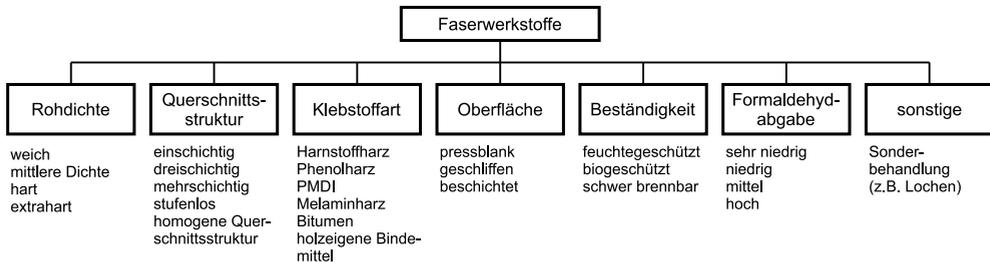


Bild 4.7 Einteilung von Faserwerkstoffen

4.2.2.5 Verbundplatten

Verbundplatten sind plattenförmige Werkstoffe, die aus mehreren Schichten symmetrisch aufgebaut sind und überwiegend eine gegenüber den Beplankungsschichten dickere Trägerschicht aufweisen. Die Schichten sind mit Klebstoff unter Einwirkung von Druck und Wärme schubfest miteinander verbunden. Bild 4.8 zeigt eine Einteilung der Verbundplatten. Bei Schaumstoffen oder Waben in der Mittellage ist die Schubfestigkeit gering; wird Vollholz (z. B. auch Balsaholz mit stehend ausgerichteten Lagen) eingesetzt, wird eine hohe Schubsteifigkeit im Vergleich zu den Materialien mit Waben oder Schaumstoffen erzielt.



Bild 4.8 Einteilung von Verbundwerkstoffen

■ 4.3 Stofflich-struktureller Aufbau von Holz und Holzwerkstoffen

Die Struktur von Holz und Holzwerkstoffen kann in eine Makro-, Mikro- und Submikrostruktur unterteilt werden. Unter Makrostruktur sind die mit bloßem Auge oder mit der Lupe sichtbaren, unter Mikrostruktur die im Mikroskop sichtbaren und unter Submikrostruktur die im Elektronenmikroskop sichtbaren Strukturmerkmale zu verstehen. Die Eigenschaften von Holz werden durch alle Strukturmerkmale gleichermaßen bestimmt. Während der mikroskopische und auch der submikroskopische Aufbau von Holzwerkstoff-

fen weitgehend dem des Holzes entspricht, ist deren Makrostruktur durch die Auflösung des Holzgefüges mehr oder weniger verändert. Strukturänderungen im mikroskopischen Bereich können auftreten z. B. durch Verdichtung der Späne oder der Furnierlagen, Bildung von Mikrobrüchen oder durch Eindringen von Kleb- und Zusatzstoffen und deren Einfluss auf die Kraftübertragung in Klebfugen sowie auf das Sorptionsverhalten. Bekannt ist auch der Einfluss einer thermischen oder hydrothermischen Behandlung beim Dämpfen und Trocknen (analog den Effekten beim Thermoholz). So haben Holzpartikelwerkstoffe in der Regel eine etwas geringere Gleichgewichtsfeuchte als Vollholz.

4.3.1 Holz

4.3.1.1 Chemischer Aufbau

Holz ist vom chemischen Aufbau her betrachtet ein Biopolymer. Es besteht hauptsächlich aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin (Stamm, 1964). In den Hohlräumen der extracellulären Matrix, aber auch in der Zellwand befinden sich weitere chemische Substanzen. Dazu gehören mehrheitlich Extraktstoffe wie Harze, Wachse und Fette. Deren Anteil variiert je nach Holzart zwischen 0,5 – 10% (auch höher bei tropischen Holzarten). Durch diese werden die Pilzresistenz, aber auch das Sorptions- sowie Quell- und Schwindverhalten und auch die Beschichtungs- und Verklebungseigenschaften maßgeblich beeinflusst.

Heute ist es mittels spektroskopischer Verfahren (NIR-Spektroskopie) und multivariater Statistik bereits möglich, mechanische Eigenschaften oder die Pilzresistenz mit der chemischen Struktur zu korrelieren. Umfangreiche Arbeiten wurden u. a. von Thumm und Meder (Thumm & Meder, 2001) durchgeführt (siehe auch Kapitel 11: Optische Eigenschaften).

4.3.1.2 Struktureller Aufbau

Eine ausführliche Beschreibung des strukturellen Aufbaus des Holzes aus chemischer und anatomischer Sicht ist in entsprechenden Fachbüchern zur Holzanatomie oder zur Holzchemie zu finden (Bosshard, 1982 – 1984) (Fengel & Wegener, 1984) (Wagenführ, 1999). Nachfolgend soll darauf nur so weit eingegangen werden, wie es für eine Beschreibung der mathematischen Beziehungen zwischen Struktur und Eigenschaften erforderlich ist.

Holz wird aus mechanischer Sicht als poröses Verbundmaterial verstanden. Der Porenanteil beträgt je nach der Rohdichte des Holzes zwischen 6 und 93% (im Mittel etwa 60%; s. Kap. 5.4 und Tabelle 5.9). Die reine Holzsubstanz (ohne Poren) kann dabei als Verbund aus Cellulose als Matrix und Lignin und Hemicellulose als Bindemittel betrachtet werden. Es werden verschiedene Strukturebenen (Makro-, Mikro- und Submikrostruktur) mit je eigenen Merkmalen unterschieden (Bild 4.9, Bild 4.10). Auf makroskopischer Ebene wird das Holz hauptsächlich durch den Faserverlauf (parallel zur Stammachse) und den zylindrischen Aufbau der Jahrringe bestimmt. Dadurch ergibt sich das für Holz typische anisotrope Verhalten mit den drei Hauptrichtungen: längs zur Faserrichtung (L), radial (R), d. h. parallel zu den Holzstrahlen bzw. von der Rinde zum Mark, sowie tangential (T), d. h. parallel zum Jahrringverlauf. Es werden drei Schnittebenen unterschieden: Querschnitt (senkrecht zur Faserrichtung), Radialschnitt (senkrecht zur Jahrringlage), Tangentialschnitt (entlang eines Jahrrings). Weiter ist zwischen dem meist wenig witterungsbestän-

digen Splintholz und dem Kernholz zu unterscheiden. Der makroskopischen Struktur überlagert sind im mikroskopischen Bereich die Dichte- und Festigkeitsgraduierung zwischen Früh- und Spätholz sowie weitere gewebebedingte Einflüsse (Lanvermann, 2014) (Wagenführ, 1979). In radialer Richtung werden die mechanischen Eigenschaften und die Quellung stark durch die Holzstrahlen beeinflusst (Burgert, 2000). Auswirkungen auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften erfolgen im submikroskopischen Bereich vor allem durch Variation des Mikrofibrillenwinkels der S2-Schicht (Butterfield, 1997) sowie den Lignifizierungsgrad der Zellwandschichten (z. B. Unterschiede zwischen juvenilem und adultem Holz, Druckholz und normalem Holz).

Wesentliche Strukturmerkmale im makroskopischen Bereich sind:

- die Schnittrichtung,
- der Faser-Last-Winkel und die Jahrringneigung,
- Splint-/Kernholz bzw. Reifholz, Kernreifholz,
- die Jahrringbreite und der Spätholzanteil,
- das Vorhandensein von Reaktionsholz,

im mikroskopischen Bereich:

- die Gewebeanteile (Gefäß-, Faser-, Holzstrahl-, Längsparenchymanteile),
- die Gewebeanordnung,
- die Gewebedimensionen (z. B. über 1 mm hohe Holzstrahlen),
- die Faserlängen und Faserwanddicken,
- der Einfluss der Holzstrahlen auf mechanische Eigenschaften und Quellung,
- der Zellwandanteil insgesamt,
- das Vorhandensein von Reaktionsholz,
- der Faserverlauf,

im submikroskopischen Bereich:

- die Dicke der Zellwandschichten,
- die Fibrillenorientierung (in S2-Schicht),
- die Lignifizierung der Zellwandschichten.

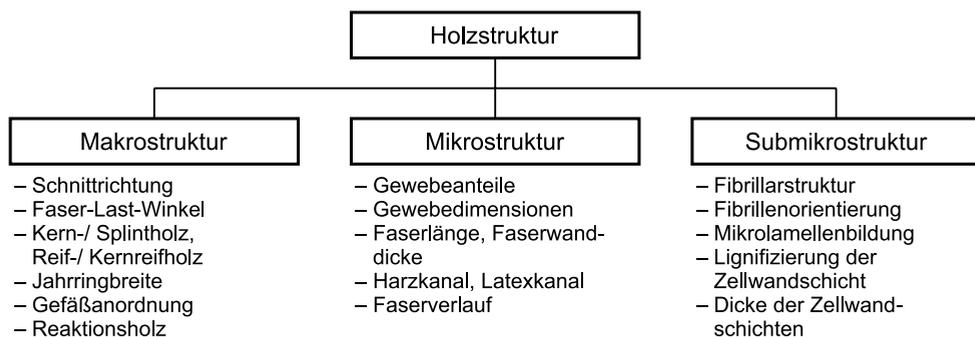
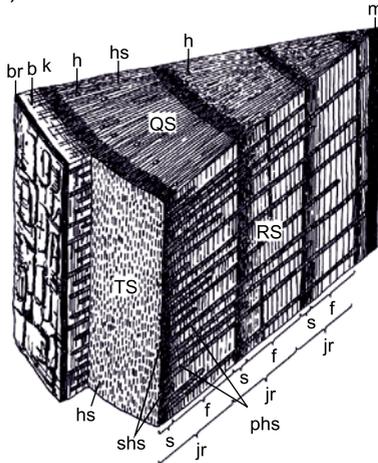
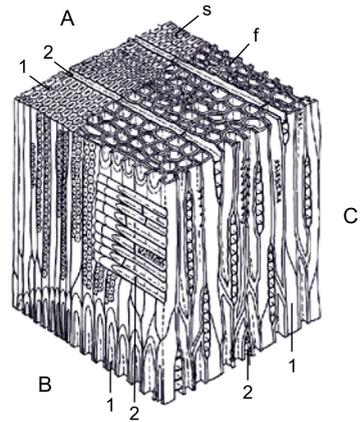


Bild 4.9 Strukturmerkmale von Holz

a) Makrostruktur



b) Mikrostruktur

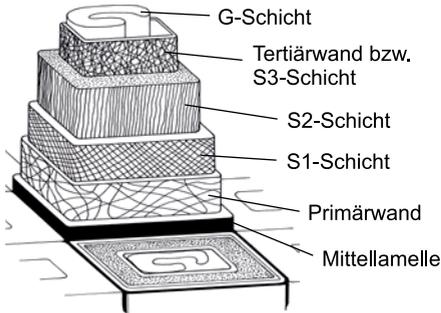


- QS Querschnittfläche
- RS Radialschnittfläche
- TS Tangentialschnittfläche
- br Borke
- b Bast
- k Kambium
- h Harzkanal
- hs Holzstrahl
- m Markröhre
- phs Primärholzstrahl
- shs Sekundärholzstrahl
- jr Jahrring
- f Frühholz
- s Spätholz

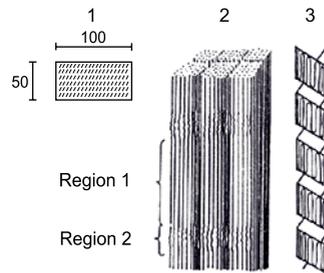
- A Querschnitt
- B Radialschnitt
- C Tangentialschnitt
- 1 Tracheiden
- 2 Holzstrahl
- s Spätholz
- f Frühholz

c) Submikrostruktur

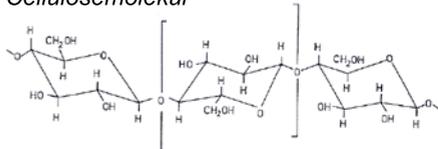
Zellwandaufbau



Aufbau der Cellulose-Mikrofibrillen



Cellulosemolekül



- 1 Querschnitt durch Mikrofibrillen
- 2 Mikrofibrillen, bestehend aus Elementarfibrillen (Region 1: kristallin; Region 2: amorph)
- 3 Helixstruktur der Cellulosemoleküle

Bild 4.10 Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus von Holz: (a) Makrostruktur von Nadelholz (nach Kollmann F., 1951)), (b) Mikrostruktur von Nadelholz (nach Oliva, zitiert in Langendorf, Schuster & Wagenführ, 1990), (c) Submikrostruktur: Zellwandaufbau von Laubholz (nach Kucera) sowie Aufbau der Cellulose-Mikrofibrillen

4.3.2 Holzwerkstoffe

4.3.2.1 Werkstoffe auf Vollholzbasis

Bild 4.11 zeigt schematisch den strukturellen Aufbau ausgewählter Werkstoffe auf Vollholzbasis. Durch die Verklebung oder anderweitige Verbindung der Lagen wird eine Homogenisierung der Holzeigenschaften erreicht. Ferner besteht die Möglichkeit, die Tragfähigkeit eines Bauteils durch Variation der Querschnittsabmessungen, des Verhältnisses der Dicke der Lagen an der gesamten Plattendicke oder auch durch Sortierung des Holzes und Einsatz von Lagen mit höherem E-Modul in den Deckschichten zu beeinflussen. Die Strukturmerkmale des Brettschichtholzes bzw. lamellierten Holzes sind, abgesehen von Klebfugen und eventuell auftretenden Stößen, mit denen des nativen Holzes identisch. Neben Klebstoffen werden zunehmend auch mechanische Verbindungsmittel wie Dübel aus Hartholz (z.B. Nägeli/Schweiz, Thoma/Österreich), Gratleisten oder auch Nägel eingesetzt. Ziel ist hier, ganz auf Chemikalien zu verzichten.

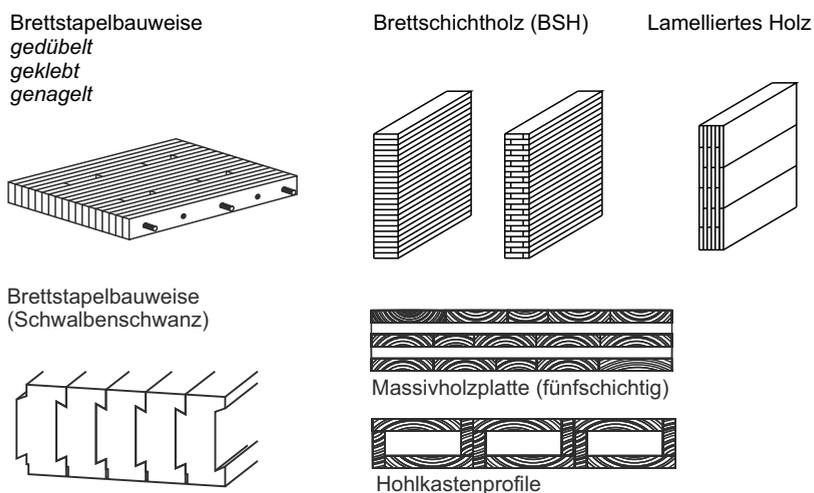


Bild 4.11 Struktureller Aufbau ausgewählter Werkstoffe auf Vollholzbasis

4.3.2.2 Werkstoffe auf Furnierbasis

Bild 4.12 zeigt schematisch den strukturellen Aufbau, Bild 4.13 die Systematik der wesentlichen Strukturparameter von Lagenholz. Lagenholz kann als ein Verbundelement aus symmetrisch übereinander geschichteten, durch eine Klebfuge schubfest miteinander verbundenen Furnierlagen betrachtet werden.

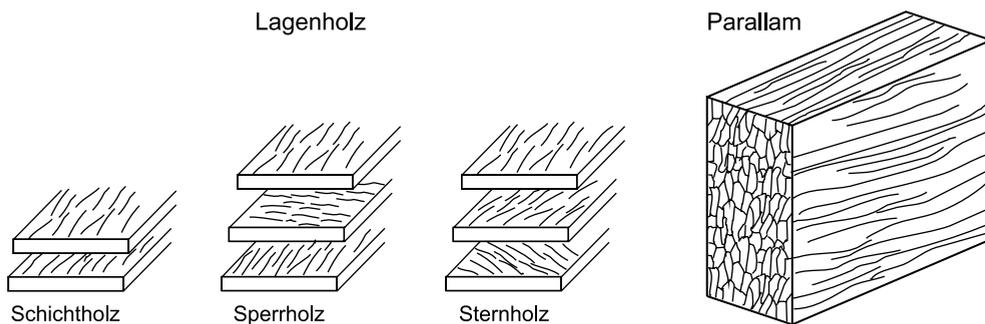


Bild 4.12 Struktureller Aufbau von Furnierwerkstoffen

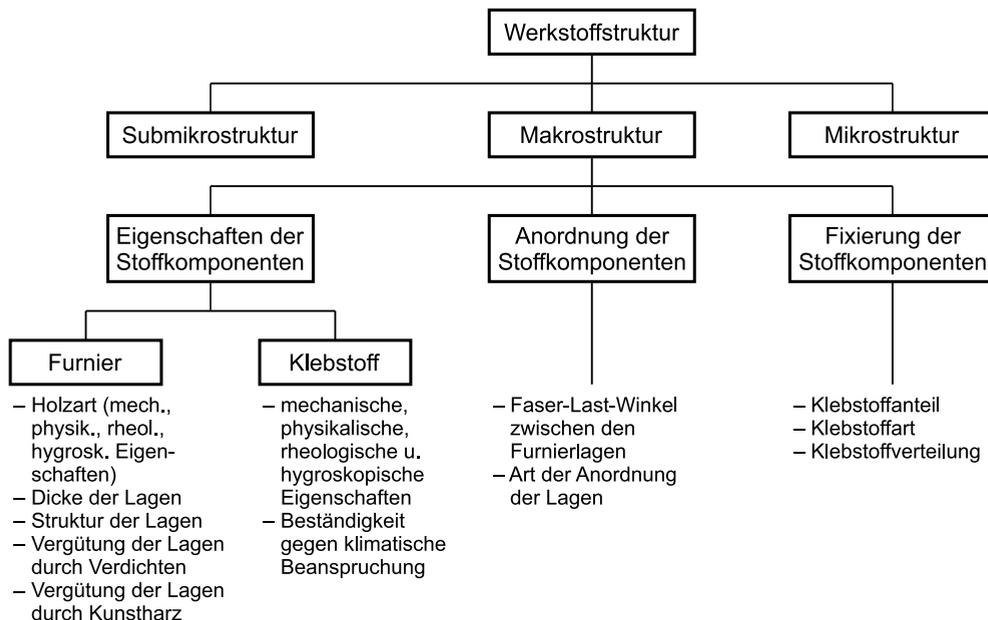


Bild 4.13 Systematik der Strukturparameter von Lagenholz

Wesentliche, die Eigenschaften bestimmende, makroskopische Strukturparameter sind:

- die Eigenschaften der Furnierlagen oder Holzlagen (Holzart),
- die Vergütung der Lagen durch Verdichten oder Tränken mit Kunstharz,
- die Anordnung (Schichtung) der Lagen - insbesondere der Faser-Last-Winkel zwischen den Lagen.

Bei größeren Abmessungen, wie der Herstellung von LVL in kontinuierlichen Pressen, wird eine Schäftung der Furnierlagen vorgenommen.

Mikroskopische Strukturmerkmale sind durch das Grenzflächenverhalten Holz/Kunstharz und durch den Pressvorgang bedingte Veränderungen der Struktur (Verdichtung des Gefüges, Bildung mikroskopischer Gefügebrüche u. a.).

4.3.2.3 Werkstoffe auf Spanbasis

Bild 4.14 zeigt ein Strukturmodell, Bild 4.15 die Systematik wesentlicher Strukturparameter von Spanplatten.

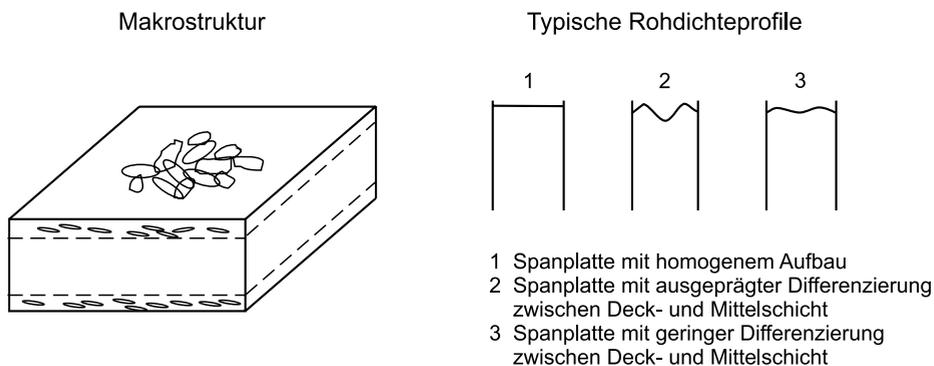


Bild 4.14 Strukturmodell von Spanplatten

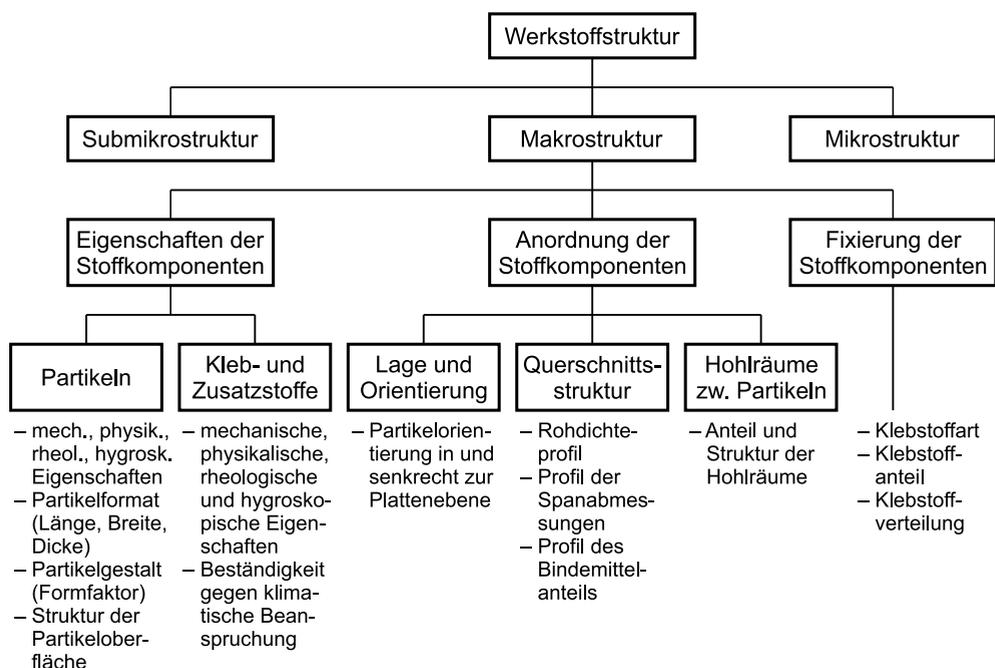


Bild 4.15 Systematik der Strukturparameter von Spanplatten

Die Spanplatte kann, makroskopisch betrachtet, in stark vereinfachter Form als ein poröses Gitternetzwerk aus sich überlappenden und kreuzenden, spanförmigen Partikeln betrachtet werden.

Der Porenanteil zwischen den Partikeln beträgt 10 bis 35 %, bezogen auf die Querschnittsfläche. Die Fixierung der Partikeln erfolgt durch meist punktförmige Leimbrücken. Senkrecht zur Plattenebene haben Spanplatten, je nach Herstellungsverfahren, ein mehr oder weniger ausgeprägtes Rohdichteprofil. Wesentliche makroskopische Strukturparameter sind:

- die Eigenschaften der Partikeln (Spanlänge, -breite, -dicke),
- die Orientierung der Partikeln und
- die Strukturierung senkrecht zur Plattenebene.

Im mikroskopischen Bereich kommt es, bedingt durch die beim Pressen auftretende Verdichtung der Partikeln, insbesondere in der Deckschicht zu einer Veränderung der Porenstruktur. Dies trifft besonders für Holzarten mit geringer Rohdichte zu, die beim Pressen relativ stärker verdichtet werden (Hänsel & Neumüller, 1988). Untersuchungen von Schneider (Schneider, 1982) zeigten, dass sich diese Verdichtung hauptsächlich auf die Poren in der Größe der Zelllumina ($r > 5 \mu\text{m}$) auswirkt (Tabelle 4.1). Der Anteil an Poren mit einem Radius $r < 1 \mu\text{m}$ (Mikroporen) ändert sich durch den Pressvorgang dagegen nur unbedeutend. Im mikroskopischen Bereich ist ferner das Grenzflächenverhalten Klebstoff/Holz und das Eindringen des Klebstoffes in die Hohlräume der Partikeln, aber auch der Einfluss des Klebstoffes auf das Sorptionsverhalten zu berücksichtigen. Die submikroskopische Struktur entspricht weitgehend der des nativen Holzes.

Tabelle 4.1 Anteil der Poren mit einem Radius $> 5 \mu\text{m}$ in nativem Holz und in Spanplatten (nach (Schneider, 1982))

Holzart	Porenanteil in %	
	in nativem Holz	in Spanplatten (Deckschicht)
Pappel	48,5	22,2
Tanne	52,0	21,2
Kiefer	51,0	21,4

Als Klebstoff kommen synthetische Klebstoffe wie Harnstoffharz, Melaminharz, PMDI sowie Mischungen dieser Klebstoffe zur Verwendung. Der Einsatz von Phenolharz ist rückläufig. Es werden auch mineralisch gebundene Spanplatten (Portlandzement, Gips) für spezielle Einsatzgebiete hergestellt (zu Normen und der Klassifizierung von Spanplatten siehe Normenverzeichnis in Kapitel 20).

Nach DIN EN 309 erfolgt eine Einteilung nach folgenden Kriterien:

- Herstellungsverfahren (flach- oder stranggepresst),
- Oberflächenbeschaffenheit (ungeschliffen, geschliffen, flüssigbeschichtet, pressbeschichtet),
- Form,
- Größe der Teilchen,
- Plattenaufbau,
- Verwendungsart (allgemeine Zwecke im Trockenbereich, Inneneinrichtungen im Trockenbereich, nicht tragende Zwecke im Feuchtbereich, tragende Zwecke im Feucht- und Trockenbereich, hoch belastbare Platten für tragende Zwecke im Feucht- und Trockenbereich).

Nach DIN EN 312 wird folgende Einteilung nach Festigkeit und Feuchtebeständigkeit (früher V 20, V 100 und V 100 G) vorgenommen (Tabelle 4.2, siehe auch Kapitel 19). Zunehmende Bedeutung gewinnen leichte Holzwerkstoffe mit z. B. geschäumter Mittellage (s. Verbundwerkstoffe).

Tabelle 4.2 Einteilung von Holzwerkstoffen nach der Festigkeit und der Feuchtebeständigkeit

Allgemeine Verwendung (im statischen Sinn nicht tragend)	Allgemein verwendbar, auch für im statischen Sinn tragende Bauteile	Hochbelastbar für im statischen Sinn tragende Bauteile
P1 für leichte Verkleidungen im Trockenbereich	P4 Trockenbereich	P6 Trockenbereich
P2 für Möbel- und Innenausbau im Trockenbereich		
P3 im Feuchtbereich (früher V100)	P5 Feuchtbereich (früher V100)	P7 Feuchtbereich

4.3.2.4 Werkstoffe auf Faserbasis

Faserplatten

Bild 4.16 zeigt ein Strukturmodell, Bild 4.17 die Systematik wesentlicher Strukturparameter von Faserplatten.

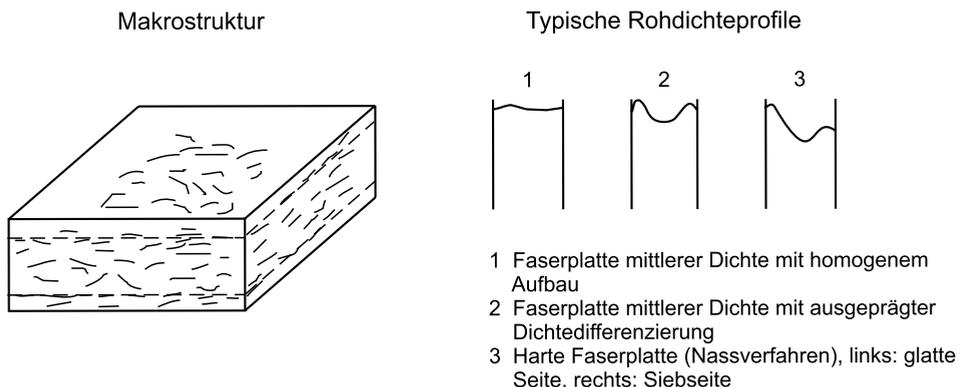


Bild 4.16 Strukturmodell von Faserplatten