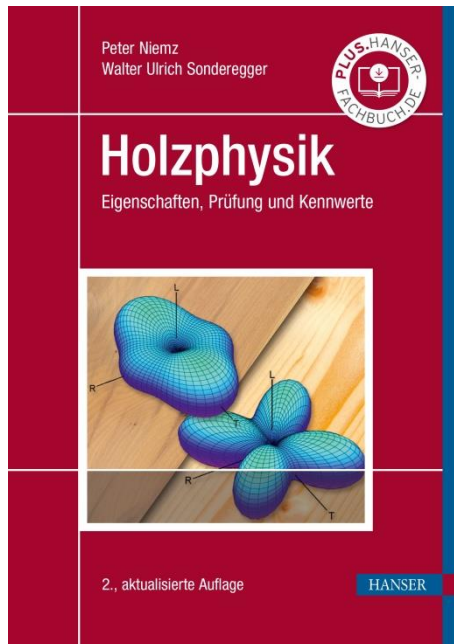


HANSER



Leseprobe

zu

Holzphysik

von Peter Niemz

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446467491>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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

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 Feuchtwechsel 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.

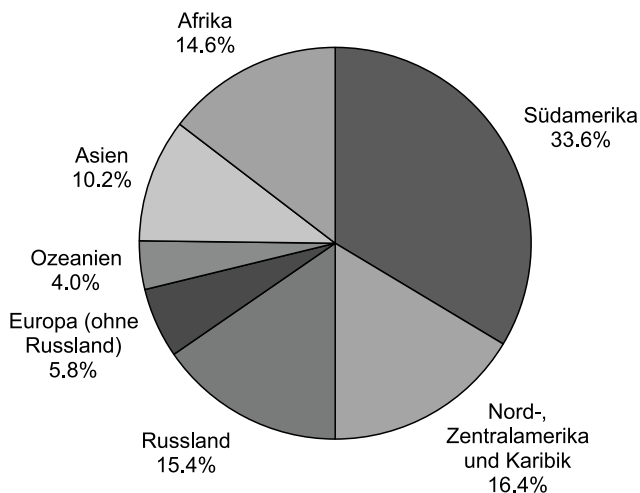


Bild 1.1 Territoriale Verteilung der in den Wäldern der Welt enthaltenen, stehenden Holzvorräte (nach (FAO, 2010))

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).

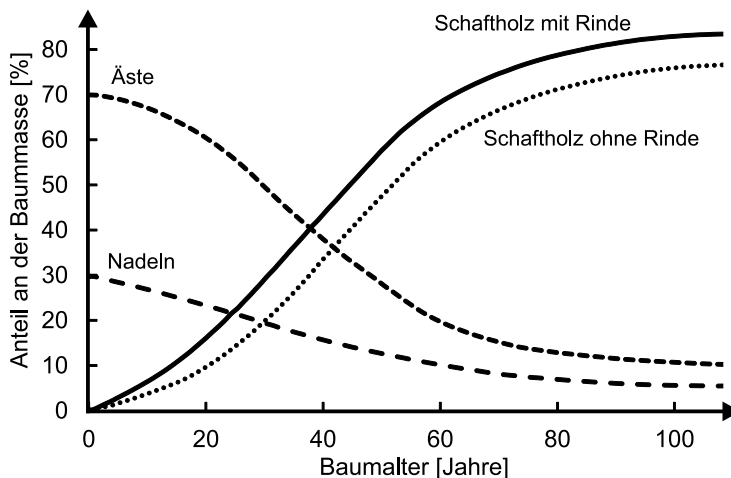


Bild 1.2 Anteil von Schaftholz, Ästen und Nadeln an der gesamten Baummasse von Fichte in Abhängigkeit vom Alter (Bloßfeld, Fiedler & Wienhaus, 1979)

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.

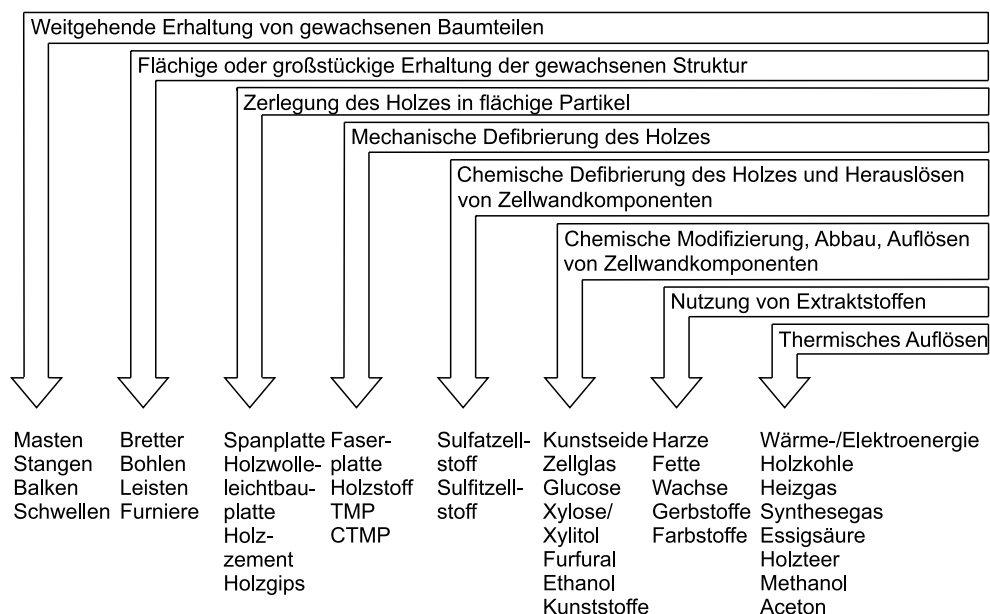


Bild 1.3 Technologie und Produkte der Holzverwertung (nach (Schulz & Wegener, 1983), verändert)

Index

A

- Abminderungsfaktor 265
- Abnutzungswiderstand 408
 - Kennwerte 411
 - Prüfverfahren 409
- aggressive Medien 265
- Akustische Eigenschaften 208
- Alterung
 - Einfluss auf Festigkeit 353
 - Farbe, Quellung/Schwindung, chemische Eigenschaften 262
 - Holz und Holzwerkstoffe 254
- Arcan-Test, Schubmodulmessung 289
- Astigkeit/Druckholz/Kerbspannungen 347
- Ausgleichsfeuchte 132

B

- Baubuche 47
- Baustoffklassen; A, B 182
- Bauteilgröße 358
- Bauteilprüfung 426
- Belastung, dynamische 404
- Belastungsart 357

- Belastungsdauer und Belastungsgeschwindigkeit 356
- BET-Methode 94
- biaxiale Belastung 426
- Biegefestigkeit 388
 - Einflussfaktoren 391
 - Prüfmethodik 388
 - Spanplatten und MDF 391
- Biegelwellen 209
- Biege-Zeitstandfestigkeit 329
- Biologische Dauerhaftigkeit 257
- Bohrwiderstand 265
- Brandverhalten 177, 181f.
 - Klassen 183
 - Partikel, Stäube 185
- Brennpunkt 177
- Brettschichtholz 46
- Brettsperrholz 46
- Brettstapelelemente 46
- Brinellhärte 405
 - Kennwerte 407f.
- Bruchdehnung 271, 378
- Bruchenergie 371
 - Klebstoffe 376
 - Materialkennwerte 374
- Bruchmechanik 369
- Bruchverhalten
 - phänomenologische Beschreibung 362

- Bruchzähigkeit
 - Holz und andere Werkstoffe 376
 - Materialkennwerte 374
- Burger Modell 331

C

- Cellulose, Hemicellulose, Lignin 422
- charakteristische Kennwerte 341
- Chemisorption 90f.
- CIE-Farbtafel 242
- Computertomographie 158

D

- Dämmstoff 48
- Dämpfen und Wärmebehandlung 354
- Dämpfungskoeffizient 288
- Darrdichte 144
- Darrmethode 126
- Dauerbeanspruchung 403
- Dauerhaftigkeit von Holz 256
- Dauerschwingfestigkeit 402
- Dauerstandfestigkeit 306, 328
- Deformationsfaktor, Kriechzahl 320

- Deformationskennwerte 309
 Deformationskörper 284
 Dehnung 276
 – beim Bruch 364
 – Dehnungszahl 276
 – Messung 427
 Delamination von Klebfugen 447
 Delaminierung 134
 – Test 263, 365
 Dendrochronologie 151
 Dendroklimatologie 151
 Dent-Methode 94
 Dichte 142
 Dichtebestimmung
 – elektromagnetische Wellen 157
 – Prüfmethode 155
 Dichteprofil
 – Messmethoden 161
 Dickenquellung der Holzwerkstoffe 114
 Dielektrizitätskonstante 200
 Diffusion 84
 – Koeffizient 86
 – Widerstandszahl 82, 88f.
 Digital-Image-Korrelation 448
 double cantilever beam 372
 Druckfestigkeit
 – Bruchbilder 387
 – Einflussfaktoren 387
 – Einfluss Rohdichte und Holzfeuchtigkeit 388
 – Prüfung 386
 Druckholz 348
 – Reaktionsholz 444
 – Rohdichte 152
 Druckplattentechnik 164
 Durchbrandzeit 184
 Dynamisch-Mechanische Analyse
 – Charakterisierung rheologischer Eigenschaften. *Siehe* Kap. 15
 Dynamisch-Mechanische Analyse, DMA 433
 Dynstat-Prüfung 400
- E**
- Eigenfrequenzmessung 230, 232
 – Korrelation mit E-Modul 232
 – Messung elastische Konstanten 230
 Eigenschaften
 – dielektrische 200
 – elektrische 195
 – magnetische 205
 Eigenspannungen 134
 – Partikelwerkstoffe 445
 Einzelfaser
 – Festigkeit 420
 elastische Eigenschaften 270, 295
 Elastizitätsmatrix 276
 Elastizitätsmodul
 – Bestimmungsmethoden 285
 – Biegebelastung, Zug- und Druckbelastung 285
 – Einfluss der Temperatur 300
 – Einfluss Holzfeuchte 299
 – Kennwerte Holz und Holzwerkstoffe 301f.
 – Schubeinfluss bei Biegung 287
 Elastomechanische und inelastische Eigenschaften 270
 elektrischer Widerstand 195
 – Einflussgrößen 196
 – Prüfverfahren 199
 elektrostatische Eigenschaften 206
 E-Modul 271, 277
 – Einfluss Belastungsart und Schnittrichtung 297
 – globaler, lokaler 285
 – Verlauf über Jahrring 298
 – Verteilung im Jahrring 425
 E-Modul-Festigkeit
 – Korrelation 296
 E-Modul, Schubmodul
 – Einflussfaktoren 298
 – Partikelwerkstoffe 299
 Energiefreisetzungsrate 373
 ESEM 362
 Extraktions- oder Destillationsverfahren 127
 Extraktstoff 97
 – Einlagerung 77
- F**
- Fachbücherverzeichnis 575
 Farbänderung
 – Einflussfaktoren 243
 – Freibewitterung 246
 – Holzarteneinfluss 244
 – transparente Beschichtungen, Innenräume 243
 – Wärmebehandlung, Dämpfen 241
 Farbe 241
 Farbkennwerte, CIELab 241
 Farbmesssysteme 243
 Faserbrückenbildung 424
 Faser-Last-Winkel 51
 – Einfluss auf Festigkeit 345
 – Hankinson 279

- Faserplatten
 - Nassverfahren, Trockenverfahren 48
 - struktureller Aufbau 57
 Fasersättigungsbereich 93
 Faserwerkstoffe 48
 FE-Modellierung 461
 Festigkeit
 - Definition 340
 - Eigenschaften 340, 344
 - Einflussfaktoren 378
 - für Holzwerkstoffe 380
 - für Vollholz 380
 Festigkeit, dynamische 340
 Festigkeitswerte
 - Holz 360f.
 - Holzwerkstoffe 361
 Feuchte
 - Aufnahme 89
 - Einfluss auf Festigkeit 349
 - Gehalt 73, 100
 - Grundlagen 74
 - Konzentrationen 430
 - Leitzahl 81
 - Messung 128
 - Transport 485
 - Verteilung im Stamm 131
 Feuchtemessverfahren, dielektrische 128
 Feuerwiderstand 184
 fibre bridging 364
 Fick'sche Gesetze 85
 Flächendichtemessgerät 158
 Flammpunkt 177
 Fließgrenzenoberfläche 382
 Fließspannung 382
 Fluoreszierende Eigenschaften 247
 Formänderung durch asymmetrische Beschichtung 447
 Fotogrammetrie 448
 Frostrisse 442
- G**
 Gamma- und Röntgenstrahlung 355
 Gasadsorption 164
 Gebrauchsklassen 257
 Gehölzformationen 22
 Geschichte der Holzphysik 31
 Gleitreibung 238
 - Zahlen 239
 Grenzbereiche Holz-Wasser 89
 Grenzen der Berechenbarkeit 460
 Größenskala für Prüfungen 419
 Gütesortierung, maschinelle 341
- H**
 Haftreibung 237
 Hailwood-Horrobin Modell 77
 Hailwood-Horrobin-Sorptionmethode 94
 Hankinson Gleichung 384
 Härtemessung nach Janka 405
 Härte und Abnutzungswiderstand 404
 HDF 58
 Heizwert 178ff.
 Holz
 - chemischer Aufbau 50
 - struktureller Aufbau 50
 - Strukturmerkmale 51
 Holzeinsatz 26
 - im Bauwesen 29
 Holzfeuchte 73
 - Einfluss auf Eigenschaften 136
 - Einfluss auf -Modul und Poissonzahl 300
 Holzforschungsinstitute 33f.
 Holzstrahlen 51
 Holz Trocknung
 - physikalische Vorgänge 118
 - Spannungen 118
 Holzverwertung 28
 Holzvorräte 24
 Holzwerkstoffe
 - Alterung 262
 - auf Furnierbasis 53
 - auf Spanbasis 55
 - auf Vollholzbasis 46, 53
 - Dauerhaftigkeit 259
 - Einfluss Probenformat auf Eigenschaften 359
 - Einteilung 45
 - Einteilung nach Festigkeit 57
 - Einteilung nach Feuchtebeständigkeit 57
 - Farbabweichungen 243
 - Methoden zur Messung der Alterung 263
 - Modellierung 466
 Holzzuwachs, Holznutzung 24
 Hooke'sches Gesetz 270, 272
 - für orthotrope Werkstoffe 273
 - verallgemeinertes 275
 Hysterese bei zyklischer Belastung 305
 Hystereseeffekt 271

I

- Imprägnierflüssigkeit 75
- Imprägnierverhalten 75
- Ingenieurkonstanten; E, G 278
- In situ Testversuche 428
- IR-Spektroskopie 434

J

- Jahrringneigung, Hankinson 279

K

- Kapillaren
 - Flüssigkeitstransport 79
 - Kondensation 92
 - Makrokapillare, Mikrokapillare, Mesokapillare 79
 - Radien 77
- KAR-Wert 347
- Kaskadennutzung 27
- Kenngößen 73
- Kerto-Schichtholz 47
- Klangholz 214
- Klimabeständigkeit
 - Einflussfaktoren 255
 - Prüfverfahren 260
- Klimatische Bedingungen 349
- Knickung 293
 - elastische Fälle, nicht elastische Fälle 293
 - Euler'sche Gleichung 294
 - nichtelastisches Knicken 294
- Kohlenstoffspeicherung 22
- Kompaktzugprobe 372
- Koordinatensystem 274
- Korrelation von Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul 358

- Korrosionsschichtdicke 267
- Korrosionsverhalten
 - Einflussfaktoren 254
 - Holz und Holzwerkstoffe 254

- Kriechen 306
 - physikalische Ursachen 306
- Kriechfaktor 309
- Kriechverformung
 - Einfluss der Zeit 312
 - Einflussfaktoren 308
 - Kennwerte 309
 - Prüfmethodik 309
 - von Holzwerkstoffen 308
- Kriechverformung, absolute 309
- Kriechverhalten
 - Einfluss Belastungsart 317
 - Einfluss chemische Modifizierung 313
 - Einflussfaktoren 313
 - Einfluss Klebstoffart 315
 - Einfluss Klima 315
 - Holzwerkstoffe 313
 - Kennwerte 310
- Kriechzahl 309
 - Abschätzung Kennwerte nach DIN EN 1156 311

L

- Lagenholz 47
- Lambwellen 209
- lamelliertes Holz 46
- Laminated Veneer Lumber, LVL 47
- Längenquellung 114
- Laufzeit Schallwellen 217
- Lebensdauer 258
- Leitfähigkeit von Holz 196
- lineare Bruchmechanik 370

- Longitudinalwellen, P-Wellen 208
- LSL 48

M

- Madison-Kurve 328
- Masse, flächenbezogene 147
- Massivholzplatten 46
- Materialkennwerte 385
- MDF 58
- Mechanosorption 321
 - Kennwerte 324
- Mehrflächenplastizitätsmodell 381
- Mikrobelastungseinrichtung 428
- Mikrofibrillenwinkel 51, 420, 424, 429, 431
- Mikro- und Makrosystem 74, 76
- Modalanalyse 230, 288
- Modellbildung
 - Eigenschaften von Holz, Holzwerkstoffe, Feuchte- und Wärmetransport 460
 - Materialkennwerte 459
- Modelle des Sorptionsverhaltens 94
- Modellierung 458
 - Eigenschaftsermittlung 452
 - Faserplatten 477
 - Materialeigenschaften, Transportvorgänge, Quellung und Schwindung, Zellwandaufbau 458
 - Mehrschichtplatten 483
 - Quellung zwischen Jahrringen 480
 - Spannungen durch Feuchteänderung 479
 - Spanplatten 471

- Validierung 458
- Verbundplatten 469
- Vollholz 463
- Modellierung Spanplatten
 - Biegefestigkeit 472
 - E-Modul 476
 - Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene 475
- Moden der Rissausbreitung 369
- Multiscale modeling 458

N

- Nadelholz 480
- Nagel- bzw. Schraubenauszieh-
widerstand 398
- Nanobereich, Mess-
verfahren 433
- Nanoindentierung 432
- Neutronen, Radiographie
und Tomographie 430
- NIR-Spektroskopie 50
 - multivariate Statistik 252
- Normalspannungen 276
- Normenverzeichnis 562

O

- Oberflächenbeschichtungen 260
- Oberflächenrauigkeit 117
- On-line-Qualitätskontrolle 452
- Optische Eigenschaften 241
- Orthotropie 273, 278
- OSB 48

P

- Parallam 47
- Partikelwerkstoffe 366
- Permeabilität; Gaspermeabilität, Flüssigkeits-
permeabilität 83

- Physikalisch-mechanische
Eigenschaften 26
- Physisorption (Adsorption) 90f.
- piezoelektrische Eigen-
schaften 203
- Pilodyn-Gerät 264
- Pilodyn-Verfahren 406
- Pilz- und Insektenbefall 353
- Plantagenholz 26
- plastische Eigenschaften 381
- plastische Verformungen 271
- Plattenverzug 445
- Poisson'sche Zahl 277
 - Kennwerte 303
 - Prüfmethode 293
 - Querkontraktionszahl 291
 - Zeiteinfluss 318
- Polardiagramm
 - Sperrholz 281
 - Sternholz 281
- Porenanteil 145
 - Holzarten 146
- Porengrößenverteilung 77, 163
- Probengeometrie 357
- Proportionalitätsgrenze 271, 378
- Prüfmethodik 356
- Prüfung
 - ab Brettern, Platten 419
 - an kleinen fehlerfreien Proben 419
 - im Mikro- und Nano-
bereich 419
- Prüfverfahren für Holz-
feuchte 123
- Prüfverfahren, innovative 419
- Pyknometer 156

Q

- Quecksilberdruckporosi-
metrie 77, 163
- Quelldruck 110
- Quellmaß 105, 111
- Quell- und Schwind-
verhalten 104, 107, 115
- Quellung
 - behinderte 109
 - Verhältnis zwischen radial
und tangential im Jahrring 483
- Quellungswärme, Ver-
dampfungswärme 92

R

- radiometrisches Verfahren
zur Feuchtemessung
 - 129
- Raman-Spektroskopie 434
- Ramberg Osborn-Gleichung 381
- Randfaserdehnung 391
- Rasterkraftmikroskopie 436
- Rauchgasimission 353
- Raumdichte, Umrechnung
Darrdichte 145
- Raumdichtezahl 144
- Rayleighwellen 209
- recyceltes Holz 29
- Reibungseigenschaften 237
- Reibungskoeffizienten 238
- Reindichte 145
- Reißlänge 385
- Resonanzkoeffizient 214
- rheologische Eigenschaften 304
- rheologisches Modell 330, 480
- Rohdichte
 - Ast- und Wurzelholz 152
 - Definition 143

- Einfluss auf Eigenschaften 164
 - Einfluss Feuchtegehalt 143
 - Einfluss Jahrringbreite 150f., 345
 - Einfluss Spätholzanteil 150
 - Einfluss Stamm 152f.
 - Holzwerkstoffe 154
 - Klima, Boden, geographische Lage 149
 - Variation 148
 - Vollholz, Holzwerkstoffe 165
 - Rohdichteprofil 154
 - Holzwerkstoffe 147
 - Spanplatten 163
 - Rohstoffpotential 23
 - Rollschub 279, 365
 - Röntgenmikro-CT 362
 - Röntgenstrahlung, Rohdichteprofilmessung 159
 - Röntgenstreuung
 - Messung Mikrofibrillenwinkel 429
 - Röntgen- und Synchrotronaufnahmen 160
- S**
- Saugspannungen 442
 - Schaftholzanteil 25
 - Schallabsorption 208, 219
 - Schallabsorptionsgrad 219
 - Schalldämmung 208, 220
 - Schallemission 208, 220
 - Anwendungsmöglichkeiten 222
 - Digital-Image-Correlation 229
 - Einflussfaktoren 221
 - Gerätesysteme 227
 - Schallemissionsanalyse
 - Anwendungsmöglichkeiten 226
 - Synchrotron 227
 - Schallgeschwindigkeit 209, 214
 - Berechnung elastischer Kennwerte 211
 - Defekterkennung 214
 - Einflussfaktoren 215
 - Gerätesysteme 217
 - Kennwerte 215
 - Wellenform, Longitudinal- und Transversalwellen 218
 - Schall, Infraschall, Ultraschall 208
 - Schallmessungen 217
 - Schallsignale 221
 - Schallwellen 214
 - Scherfestigkeit 392
 - Einflussfaktoren 393
 - Kennwerte 393
 - Schlagzähigkeit 399
 - Einflussfaktoren, Kennwerte 400
 - Schmalflächenhärte von Spanplatten 406
 - Schnittrichtung 51
 - Schubmodul 277
 - Bestimmungsmethoden 289
 - Schubspannungen 276
 - Schubversagen 365
 - Schüttdichte 146
 - Schwellfestigkeit 403
 - Schwindmaß 107, 111
 - Schwindung, differentielle 112
 - Selbstentzündung 178
 - Sicherheitsfaktoren 340
 - Skalierung 420
 - Sondermerkmale des Holzes 464
 - Sorption 90
 - Sorptionsisotherme 95, 98
 - Adsorption, Desorption, Hysterese 96
 - Holzwerkstoffe 100
 - Sortierkriterien 359
 - Spaltbarkeit 397
 - Spaltfestigkeit 397
 - Spanformteile 48
 - Spannungen durch Feuchteeinwirkung 449
 - Spannungen und Verformungen 441
 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm 273
 - Spannungs-Dehnungsverhalten 465
 - Spannungsnachweis 448
 - Spannungs-Nulllinie 390
 - Spannungsrelaxation 306, 325
 - Einflussfaktoren 326
 - vorgespannte Elemente 327
 - Spannungsverteilung bei Biegebelastung 390
 - Spanplatten
 - Porenanteil 55
 - Porenanteil, Klebstoffart 56
 - struktureller Aufbau 55
 - Spanwerkstoffe 48
 - Speckle-Interferometrie 448
 - Speichermodul 305
 - spektrometrische Eigenschaften 247
 - spektrometrisches Verfahren 130
 - spezifischer elektrischer Widerstand 196
 - spezifische Wärmekapazität 172
 - statische Festigkeit 340
 - statische Verteilung 341

- Stauchbrüche
 - Einfluss auf Festigkeit 355
 - Windeinwirkung 445
 Steifigkeitswerte
 - Brettschichtholz, Rundholz 302
 - Holzwerkstoffe 303
 Stichprobenumfang 343
 Stickoxidemission 181
 Streudichte 146, 154
 - Messmethoden 163
 Struktur 43
 Struktur des Holzes
 - Einfluss auf Festigkeit 344
 - hierarchischer Aufbau 421
 Strukturebenen
 - Makro-, Mikro-, Submikrostruktur 50
 Struktur-Eigenschaftsbeziehungen 49
 Strukturmechanik 61
 Strukturparameter
 - Brettschichtholz, Lagenholz 63
 - Faserplatten 68
 - Holz 62
 - Spanplatten 65
 - Verbundplatten 69
 Sylviscan 159, 431
 Symbolverzeichnis 575
 Synchrotron 428
 Synchrotrontomographie 362
- T**
- Temperatur 186, 351
 Temperatureinwirkung, langzeitige 189
 Tensortransformation 275, 282
 thermische Eigenschaften 168
 thermische Zersetzung 178
 Thermographie 190
 Tischlerplatten 47
 Tomographie 429
 - Röntgen, Synchrotronlicht 159
 Torsionsfestigkeit 395
 - Einflussfaktoren, Kennwerte 396
 Torsionsmodul 290
 Tracheideffekt 246
 Transversalwellen, Scherwellen 208
 Trocknungsdauer 122
 Trocknungsspannung 450
 Tüpfel 75
 Tüpfelverklebung 77
- U**
- Ultraschall
 - Berechnung
 - E-Modul, Schubmodul, Poissonzahl 213
 - Berechnung Poissonzahl 212
 - Korrekturfaktoren Steifigkeit 211
 UV-Strahlung 255
- V**
- Variationskoeffizienten 348
 Variationskoeffizienten der Eigenschaften 343
 Verarbeitung von Holz 27
 Verbundelemente 47
 Verbundplatten
 - Einteilung 49
 - struktureller Aufbau 59
 Verdichten von Holz 378
 Verformung von Schnittholz 116
 Vergrauung 255
 Verkernung 77, 152
 Verklebungsgüte 365
 Verlustmodul 305
 Verlustwinkel, dielektrische 202
 Verthyllung 78
 viskoelastische Materialien 304
 Voigt'sche Beschreibungsweise 277
 Voigt'sche Notation 276
 Vollholz
 - Alterung 262
 - Einteilung 44
 Volumeneffekt 420
 Vorbeanspruchung, mechanische 264
 Vorgeschichte 353
- W**
- Waferboard 48
 Waldflächen 24
 Wärmeausdehnung 175
 Wärmebehandlung
 - Einflussfaktoren 243
 Wärmekapazität 168 f.
 Wärmeleitfähigkeit 168
 - Holz, Holzwerkstoffe 170
 - Schnittrichtung, Feuchte, Rohdichte 169
 Warnfähigkeit 220
 Wasseranteil 73
 Wasseraufnahmekoeffizient 84
 Wasserdampfdiffusionswiderstand 87
 Wassergehalt 74
 Wechselfestigkeit 403
 Wechselwirkungen Struktur und Eigenschaften 61
 Weibull-Verteilung 359
 Wellenlänge, Schallgeschwindigkeit 213

Wertschöpfung 28
Witterungsbeständigkeit
 256
Wöhler-Verfahren 403
Wood Plastic Composites,
 WPC 60
Wuchsspannungen 442
 – Messung 443

X

Xenontest 261

Y

Young's modulus 271

Z

zeitabhängiger (reduzierter)
 Elastizitätsmodul 309
Zellkollaps 123
Zellwandaufbau 52
Zugfestigkeit 378, 383
 – Berechnung 465

 – Einfluss Belastungsrich-
 tung und Belastungsart
 378
 – Prüfung 383
Zugholz 444
Zündpunkt 177
Zündtemperatur 185
Zündverzögerung 177
zwischenpartikuläre
 Verschiebung 368
zyklische Belastung 271,
 273