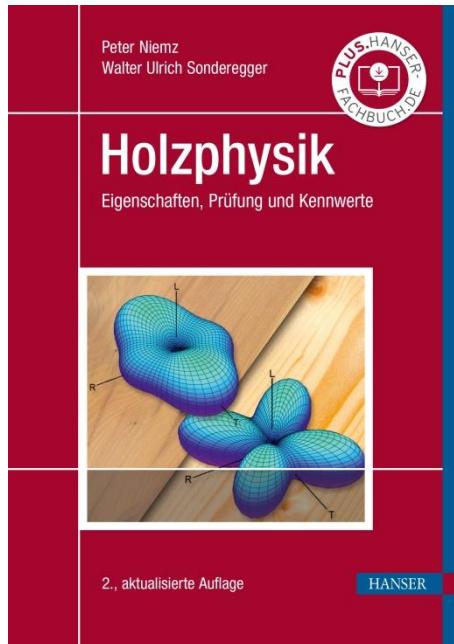


# HANSER



## 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 PowerPoint-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 Festigkeitssortierung 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 Aufnahmegereschwindigkeit.

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 Gesamtredaktion 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

<b>■ Vorwort .....</b>	<b>5</b>
<b>■ Datenbank für Kennwerte zum Feuchte- und Wärmetransport in Holz und Holzwerkstoffen .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Einführung .....</b>	<b>22</b>
<b>2 Geschichte der Physik des Holzes .....</b>	<b>31</b>
<b>3 Übersicht zu physikalischen Eigenschaften des Holzes und wichtigen Einflussfaktoren .....</b>	<b>40</b>
<b>4 Struktur und Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen ...</b>	<b>43</b>
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
<b>5</b>	<b>Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen gegenüber Feuchte ..</b>	<b>73</b>
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
<b>6</b>	<b>Dichte von Holz und Holzwerkstoffen</b>	<b>142</b>
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 Dichteprofils 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 Schütdichte 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
<b>7</b>	<b>Thermische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen .....</b>	<b>168</b>
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
<b>8</b>	<b>Elektrische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen .....</b>	<b>195</b>
8.1	Elektrischer Widerstand und Leitfähigkeit .....	195
8.1.1	Kenngrößen .....	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	Kenngrößen .....	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	Kenngrößen .....	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
<b>9</b>	<b>Akustische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen .....</b>	<b>208</b>
9.1	Übersicht .....	208
9.2	Arten und Ausbreitungsformen von Wellen .....	208
9.3	Schallgeschwindigkeit .....	209
9.3.1	Kenngrößen .....	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
<b>10</b>	<b>Reibungseigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen</b>	<b>237</b>
<b>11</b>	<b>Optische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen</b>	<b>241</b>
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
<b>12</b>	<b>Korrosionsverhalten und Alterung von Holz und Holzwerkstoffen</b>	<b>254</b>
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

---

<b>13 Elastomechanische und inelastische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen</b> .....	<b>270</b>
13.1 Übersicht .....	270
13.2 Elastische Eigenschaften .....	270
13.2.1 Elastizitätsgesetz und Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Hooke'sches Gesetz) .....	270
13.2.1.1 Allgemeine Grundlagen im eindimensionalen Belastungsfall .....	270
13.2.1.2 Verallgemeinertes Hooke'sches Gesetz für orthotrope Werkstoffe .....	273
13.2.2 Zur Orthotropie des Holzes und der Holzwerkstoffe .....	278
13.2.3 Tensortransformation .....	282
13.3 Kenngrößen 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 Kenngröße .....	289
13.3.2.2 Prüfung .....	290
13.3.3 Poissonszahl .....	291
13.3.3.1 Kenngröße .....	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 Poissonsahlen .....	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 Kenngrößen/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 Kenngrößen/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 Kenngrößen/Prüfung .....	328
13.5.5.3 Einflussfaktoren und Materialkennwerte .....	328
13.5.6 Rheologische Modelle .....	330

---

<b>14 Festigkeitseigenschaften</b> .....	<b>340</b>
14.1 Übersicht .....	340
14.2 Wirkung wesentlicher Einflussfaktoren .....	344
14.2.1 Struktur des Holzes .....	344
14.2.1.1 Faser-Last-Winkel/Schnittrichtung .....	344
14.2.1.2 Rohdichte und Jahrringe .....	345
14.2.1.3 Astigkeit/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 Prüfmethode .....	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 Prüfmethode .....	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 Schraubenausziehwiderstand .....	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

---

<b>15</b>	<b>Neue innovative Prüfverfahren</b>	<b>419</b>
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
<b>16</b>	<b>Spannungen und Verformungen in Holz und Holzwerkstoffen</b>	<b>441</b>
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
<b>17</b>	<b>Nutzung holzphysikalischer Eigenschaften zur On-line-Qualitätskontrolle</b>	<b>452</b>
<b>18</b>	<b>Modellierung von Holz und Holzwerkstoffen: Möglichkeiten und Grenzen</b>	<b>458</b>
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 Feuchtwchsel 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
<b>19</b>	<b>Verzeichnis wichtiger Kennwerte und Eigenschaften . . . . .</b>	<b>492</b>
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	Güteanforderungen . . . . .	510
19.2.4.1	Güteanforderungen an Rund- und Schnittholz (Nadelholz) . . . . .	510
19.2.4.2	Güteanforderungen an Rund- und Schnittholz (Laubholz) . . . . .	513
19.2.4.3	Güteanforderungen an Rund- und Schnittholz (Nadelholz und Laubholz) . . . . .	515
19.2.5	Güteanforderungen 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
<b>20</b>	<b>Verzeichnis ausgewählter Normen, Symbole und weiterführender Literatur . . . . .</b>	<b>562</b>
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
<b>Index</b>		<b>579</b>

# 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 Zuachswerte 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-

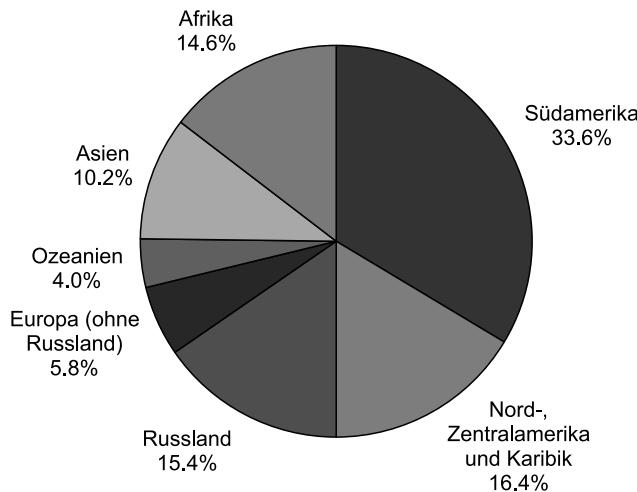
holz, Äste, Reisig) und 20 % unterirdische Biomasse (Wurzeln) (Schmithüsen, et al., 2014). Damit wird auch die Bedeutung des Waldes zur Senkung des CO<sub>2</sub> deutlich. Für die europäischen Länder stieg die Kohlenstoffspeicherung zwischen 2005 bis 2010 um jährlich 0,5 %.

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

Vegetationsgebiete	Fläche in 10 <sup>6</sup> ha	Vorrat an Trockenmasse		Zuwachs an Trockenmasse	
		in 10 <sup>9</sup> t	in t/ha	in 10 <sup>9</sup> t/a	in t/a ha
<b>1. Tropische und subtropische Gebiete</b>					
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
<b>2. Gemäßigte (temperierte) Gebiete</b>					
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
<b>3. Boreale Gebiete</b>					
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
<b>Gesamt</b>	<b>4473</b>	<b>995,7</b>	<b>224,4</b>	<b>51,5</b>	<b>11,6</b>

### Verfügbarkeit des Holzes

Von wirtschaftlichem Interesse ist das in der akkumulierten Phytomasse der Wälder enthaltene nutzbare Holz, dessen Menge in m<sup>3</sup> oder, forstlichem Sprachgebrauch entsprechend, in „Erntefestmetern“ (EfM oder Fm) angegeben wird. Nach FAO-Daten für das Jahr 2010 betragen die Holzvorräte der Erde 527 · 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (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 (Schmitthüsen, 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 (1000 ha)	Anteil an weltweitem Wald (%)	Anteil an Landfläche (%)	Waldflächen- änderung 1990/2000 (1000 ha/Jahr)	Waldflächen- änderung 2000/2010 (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-, Zentral- amerika 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).

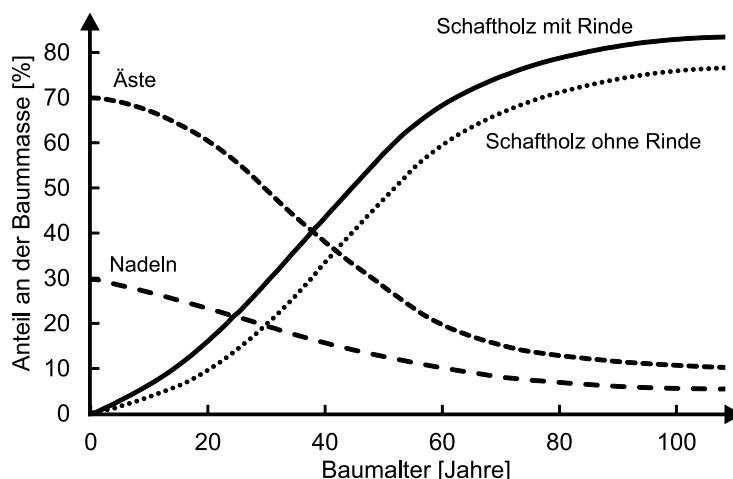


Bild 1.2 Anteil von Schaftholz, Ästen und Nadeln an der gesamten Baummasse von Fichte in Abhängigkeit vom Alter (Bloßfeld, Fiedler &amp; Wienhaus, 1979)

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 (Zerspaner-technologie).

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 Sägewerk, 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 damalig 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-Rechnungen, 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 CO<sub>2</sub>-Reduzierung, die Eigenschaft von Holz als CO<sub>2</sub>-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 Versorgungsgängen.

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, Brettstapelemente) 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.

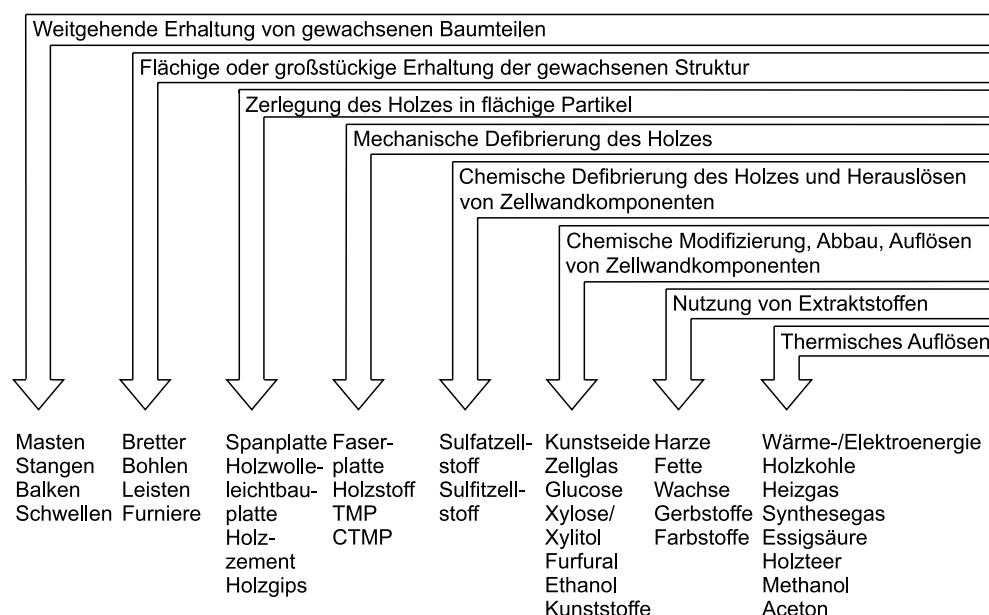
**Tabelle 1.4** Produktion von Industrie- und Brennholz in der Welt in Mio. m<sup>3</sup> (Bemmamn, 2014)

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 (Bemmamn, 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/Schwingung, 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
- Biegewellen 209
- Biege-Zeitstandfestigkeit 329
- Biologische Dauerhaftigkeit 257
- Bohrwiderstand 265
- Brandverhalten 177, 181f.
  - Klassen 183
  - Partikel, Stäube 185
- Brennpunkt 177
- Brettschichtholz 46
- Brettsperrholz 46
- Brettstapelemente 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
- Chemiesorption 90f.
- CIE-Farbtafel 242
- Computertomographie 158

## D

- Dämmstoff 48
- Dämpfen und Wärmebehandlung 354
- Dämpfungsdecrement 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  
 - Prüfmethoden 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  
 Energiefreisetzungsraten 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 247  
 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-Sorptionsmethode 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
- Holztrocknung  
- 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
- Hystereseffekt 271

<b>I</b>	Korrosionsschichtdicke 267	Longitudinalwellen, P-Wellen 208
Imprägnierflüssigkeit 75	Korrosionsverhalten	LSL 48
Imprägnierverhalten 75	- Einflussfaktoren 254	
Ingenieurkonstanten; E, G 278	- Holz und Holzwerkstoffe 254	
In situ Testversuche 428	Kriechen 306	<b>M</b>
IR-Spektroskopie 434	- physikalische Ursachen 306	Madison-Kurve 328
	Kriechfaktor 309	Masse, flächenbezogene 147
<b>J</b>	Kriechverformung	Massivholzplatten 46
Jahrringneigung, Hankinson 279	- Einfluss der Zeit 312	Materialkennwerte 385
	- Einflussfaktoren 308	MDF 58
	- Kennwerte 309	Mechanosorption 321
	- Prüfmethodik 309	- Kennwerte 324
	- von Holzwerkstoffen 308	Mehrflächenplastizitäts- modell 381
<b>K</b>	Kriechverformung, absolute 309	Mikrobelastungseinrichtung 428
Kapillaren	Kriechverhalten	Mikrofibrillenwinkel 51, 420, 424, 429, 431
- Flüssigkeitstransport 79	- Einfluss Belastungsart 317	Mikro- und Makrosystem 74, 76
- Kondensation 92	- Einfluss chemische Modifizierung 313	Modalanalyse 230, 288
- Makrokapillare, Mikroka- pillare, Mesokapillare 79	- Einflussfaktoren 313	Modellbildung
- Radien 77	- Einfluss Klebstoffart 315	- Eigenschaften von Holz, Holzwerkstoffe, Feuchte- und Wärmetransport 460
KAR-Wert 347	- Einfluss Klima 315	- Materialkennwerte 459
Kaskadennutzung 27	- Holzwerkstoffe 313	Modelle des Sorptions- verhaltens 94
Kenngrößen 73	- Kennwerte 310	Modellierung 458
Kerto-Schichtholz 47	Kriechzahl 309	- Eigenschaftsermittlung 452
Klangholz 214	- Abschätzung Kennwerte nach DIN EN 1156 311	- Faserplatten 477
Klimabeständigkeit		- Materialeigenschaften, Transportvorgänge, Quel- lung und Schwindung, Zellwandaufbau 458
- Einflussfaktoren 255	<b>L</b>	- Mehrschichtplatten 483
- Prüfverfahren 260	Lagenholz 47	- Quellung zwischen Jahr- ringen 480
Klimatische Bedingungen 349	Lambwellen 209	- Spannungen durch Feuchteänderung 479
Knickung 293	Iamelliertes Holz 46	- Spanplatten 471
- elastische Fälle, nicht elastische Fälle 293	Laminated Veneer Lumber, LVL 47	
- Euler'sche Gleichung 294	Längenquellung 114	
- nichtelastisches Knicken 294	Laufzeit Schallwellen 217	
Kohlenstoffspeicherung 22	Lebensdauer 258	
Kompaktzugprobe 372	Leitfähigkeit von Holz 196	
Koordinatensystem 274	lineare Bruchmechanik 370	
Korrelation von Biegefesto- keit und Elastizitätsmodul 358		

- 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. Schraubenausziehwiderstand 398
  - Nanobereich, Messverfahren 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, Flüssigkeitspermeabilität 83
  - Physikalisch-mechanische Eigenschaften 26
  - Physisorption (Adsorption) 90f.
  - piezoelektrische Eigenschaften 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
    - Prüfmethoden 293
    - Querkontraktionszahl 291
    - Zeiteinfluss 378
  - 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 Nanobereich 419
  - Prüfverfahren für Holzfeuchte 123
  - Prüfverfahren, innovative 419
  - Pyknometer 156
- Q**
- Quecksilberdruckporosimetrie 77, 163
  - Quelldruck 110
  - Quellmaß 105, 111
  - Quell- und Schwindverhalten 104, 107, 115
  - Quellung
    - behinderte 109
    - Verhältnis zwischen radial und tangential im Jahrring 483
  - Quellungswärme, Verdampfungswärme 92
- R**
- radiometrisches Verfahren zur Feuchtemessung
    - 129
  - Raman-Spektroskopie 434
  - Ramberg Osborn-Gleichung 381
  - Randfaserdehnung 391
  - Rasterkraftmikroskopie 436
  - Rauchgasimmission 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 Synchrotron-aufnahmen 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 Feuchteinwirkung 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	thermische Zersetzung 178	Verklebungsgüte 365
- Einfluss auf Festigkeit 355	Thermographie 190	Verlustmodul 305
- Windeinwirkung 445	Tischlerplatten 47	Verlustwinkel, dielektrische 202
Steifigkeitswerte	Tomographie 429	Verhyllung 78
- Brettschichtholz, Rundholz 302	- Röntgen, Synchrotronlicht 159	viskoelastische Materialien 304
- Holzwerkstoffe 303	Torsionsfestigkeit 395	Voigt'sche Beschreibungsweise 277
Stichprobenumfang 343	- Einflussfaktoren, Kennwerte 396	Voigt'sche Notation 276
Stickoxidemission 181	Torsionsmodul 290	Vollholz
Streudichte 146, 154	Tracheideffekt 246	- Alterung 262
- Messmethoden 163	Transversalwellen, Scherwellen 208	- Einteilung 44
Struktur 43	Trocknungsdauer 122	Volumeneffekt 420
Struktur des Holzes	Trocknungsspannung 450	Vorbeanspruchung, mechanische 264
- Einfluss auf Festigkeit 344	Tüpfel 75	Vorgeschichte 353
- hierarchischer Aufbau 421	Tüpfelverklebung 77	
Strukturebenen	<b>U</b>	
- Makro-, Mikro-, Submikrostruktur 50	Ultraschall	Waferboard 48
Struktur-Eigenschaftsbeziehungen 49	- Berechnung	Waldflächen 24
Strukturmechanik 61	- E-Modul, Schubmodul, Poissonzahl 213	Wärmeausdehnung 175
Strukturparameter	- Berechnung Poissonzahl 212	Wärmebehandlung
- Brettschichtholz, Lagenholz 63	- Korrekturfaktoren Steifigkeit 211	- Einflussfaktoren 243
- Faserplatten 68	UV-Strahlung 255	Wärmekapazität 168f.
- Holz 62	<b>V</b>	
- Spanplatten 65	Variationskoeffizienten 348	Wärmeleitfähigkeit 168
- Verbundplatten 69	Variationskoeffizienten der Eigenschaften 343	- Holz, Holzwerkstoffe 170
Sylviscan 159, 431	Verarbeitung von Holz 27	- Schnittrichtung, Feuchte, Rohdichte 169
Symbolverzeichnis 575	Verbundelemente 47	Warnfähigkeit 220
Synchrotron 428	Verbundplatten	Wasseranteil 73
Synchrotron томография 362	- Einteilung 49	Wasseraufnahmekoeffizient 84
<b>T</b>		Wasserdampfdiffusionswiderstand 87
Temperatur 186, 351	Verdichten von Holz 378	Wassergehalt 74
Temperatureinwirkung, langzeitige 189	Verformung von Schnittholz 116	Wechselfestigkeit 403
Tensortransformation 275, 282	Vergrauung 255	Wechselwirkungen Struktur und Eigenschaften 61
thermische Eigenschaften 168	Verkernung 77, 152	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 Belastungsrichtung und Belastungsart 378  
- Prüfung 383  
Zugholz 444  
Zündpunkt 177  
Zündtemperatur 185  
Zündverzögerung 177  
zwischenpartikuläre Verschiebung 368  
zyklische Belastung 271, 273