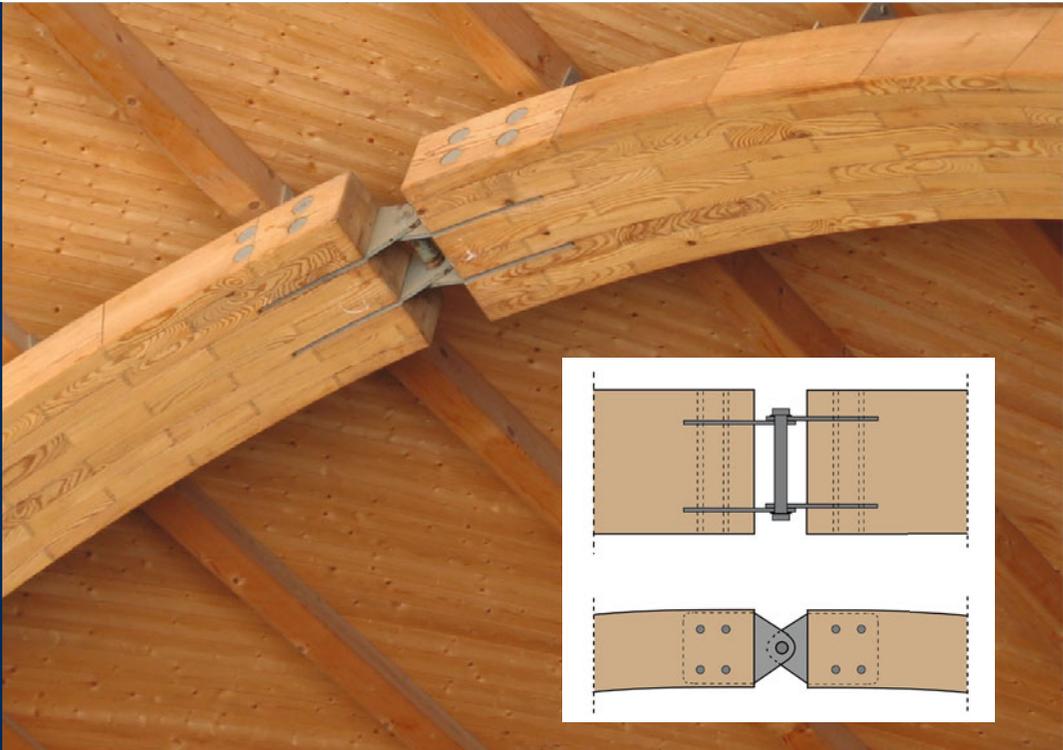


# Ingenieurholzbau

## Basiswissen: Tragelemente und Verbindungen

Werner Seim, Johannes Hummel

Bauingenieur-Praxis





**Ingenieurholzbau**



# Ingenieurholzbau

Basiswissen:  
Tragelemente und Verbindungen

*Werner Seim und Johannes Hummel*

Mit Beiträgen von Timo Claus, Lars Eisenhut, Michael Schick und Tobias Vogt

## Autoren

### *Prof. Dr.-Ing. Werner Seim*

Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau  
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau  
Universität Kassel  
Kurt-Wolters-Straße 3  
34125 Kassel  
Deutschland

### *Dr.-Ing. Johannes Hummel*

Saarlandstraße 4  
34131 Kassel  
Deutschland

## Titelbild

Mercado Santa Caterina, Barcelona  
(Foto und Grafik: Werner Seim)

Alle Bücher von Ernst & Sohn werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2019 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

**Print ISBN** 978-3-433-03232-9

**ePDF ISBN** 978-3-433-60926-2

**ePub ISBN** 978-3-433-60927-9

**oBook ISBN** 978-3-433-60925-5

**Umschlaggestaltung** Stefanie Eckert-Kimmig, stilvoll

**Satz** le-tex publishing services GmbH, Leipzig

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** IX

**Abkürzungsverzeichnis** XI

<b>1</b>	<b>Holz als Konstruktionswerkstoff</b>	<b>1</b>
1.1	Bauen mit Holz – Vorteile und Herausforderungen	1
1.2	Mechanische Eigenschaften von Vollholz	2
1.2.1	Einfluss der Faserrichtung	3
1.2.2	Festigkeiten von Vollholz	3
1.2.3	Verformungseigenschaften von Holz	5
1.2.4	Einfluss der Belastungsdauer und der Feuchte	7
1.3	Holzprodukte	9
1.3.1	Konstruktionsvollholz und Balkenschichtholz	9
1.3.2	Brettschichtholz (BSH)	10
1.3.3	Brettsperrholz	11
1.4	Holzwerkstoffe	12
1.4.1	Furnierschichtholz	12
1.4.2	Sperrholz	13
1.4.3	Oriented-Strand-Board-Platten (OSB-Platten)	13
1.4.4	Spanplatten	14
1.4.5	Faserplatten	15
<b>2</b>	<b>Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit stabförmiger Bauteile</b>	<b>17</b>
2.1	Grundlagen der Bemessung	17
2.1.1	Einwirkungskombinationen	18
2.1.2	Modifikationsbeiwerte und Verformungsbeiwerte	19
2.2	Biegung	20
2.3	Schub	22
2.4	Torsion und Rollschub	24
2.5	Stabilität	24
2.5.1	Knicken – Ersatzstabverfahren	26
2.5.2	Kippen – Ersatzstabverfahren	29
2.5.3	Biegedrillknicken	35
2.5.4	Berechnungen nach Theorie II. Ordnung	35
2.6	Zug und Biegung	36

2.7	Querdruck	38
2.8	Querzug	38
2.8.1	Allgemeines	38
2.8.2	Queranschlüsse	39
2.8.3	Ausklinkung	40
2.9	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)	42
2.9.1	Durchbiegungen	42
2.9.2	Schwingungen	44
<b>3</b>	<b>Anschlüsse und Verbindungen</b>	<b>45</b>
3.1	Allgemeines	45
3.2	Kontakt	46
3.2.1	Druck rechtwinklig zur Faser	46
3.2.2	Druck unter einem Winkel zur Faserrichtung	49
3.3	Stiftförmige Verbindungsmittel	50
3.3.1	Überblick	50
3.3.2	Zusammenwirken und Verformungsverhalten	50
3.3.3	Grundlagen der Berechnung bei Beanspruchung auf Abscheren	54
3.3.4	Holz-Holz- und Holz-Holzwerkstoff-Verbindungen – Abscheren	57
3.3.5	Holz-Holz- und Holz-Holzwerkstoff-Verbindungen – Abscheren, vereinfachtes Verfahren	59
3.3.6	Stahlblech-Holz-Verbindungen – Abscheren	59
3.3.7	Stahlblech-Holzverbindungen – Abscheren, vereinfachtes Verfahren	61
3.4	Stabdübel/Passbolzen	62
3.5	Nägeln und Klammern	66
3.5.1	Begriffe und Definitionen	66
3.5.2	Konstruktive Regeln für Nägel	68
3.5.3	Konstruktive Regeln für Klammern	71
3.5.4	Tragfähigkeit	72
3.6	Dübel besonderer Bauart	76
3.6.1	Tragwirkung	76
3.6.2	Konstruktive Regeln	77
3.6.3	Tragfähigkeit	78
3.7	Geschraubte Verbindungen	84
3.7.1	Begriffe und Definitionen	84
3.7.2	Entwurf geschraubter Verbindungen	86
3.7.3	Tragfähigkeit	89
3.7.4	Anwendungsbeispiele und Ausführung	92
3.8	Blockscheren	92
<b>4</b>	<b>Bauteile und Konstruktionsregeln</b>	<b>97</b>
4.1	Dach-, Decken- und Wandkonstruktionen	97
4.1.1	Geneigte Dächer	97
4.1.2	Flachdächer	99
4.1.3	Decken	102
4.1.4	Wände	106

- 4.2 Brettschichtholzträger 111
  - 4.2.1 Pultdachträger 111
  - 4.2.2 Satteldachträger 115
  - 4.2.3 Gekrümmte Träger und Satteldachträger mit gekrümmtem Untergurt 116
- 4.3 Aussteifungsregeln und Konstruktionsdetails 117
  - 4.3.1 Grundlagen 117
  - 4.3.2 Dächer 119
  - 4.3.3 Skelettbau 123
  - 4.3.4 Decken und Wände 132
  - 4.3.5 Lastaufteilung 132
- 4.4 Holztafelbauweise 134
  - 4.4.1 Allgemeines 134
  - 4.4.2 Wandelemente 135
  - 4.4.3 Deckenelemente 139
  - 4.4.4 Anschlussdetails 141
- 5 Dauerhaftigkeit 143**
  - 5.1 Grundsätze und Definitionen 143
  - 5.2 Sichere Konstruktionen 146
  - 5.3 Konstruktiver Holzschutz 147
  - 5.4 Dauerhafte Hölzer 150
  - 5.5 Chemischer Holzschutz 151
  - 5.6 Korrosionsschutz 152
- 6 Brandschutz 155**
  - 6.1 Einführung 155
  - 6.2 Begriffe und rechtliche Regelungen 156
    - 6.2.1 Vorschriften zum Brandschutz 156
    - 6.2.2 Gebäudeklassen 158
    - 6.2.3 Anforderungen an Bauteile und Baustoffe 159
    - 6.2.4 Baustoffklassen und Feuerwiderstandsdauer 160
    - 6.2.5 Kapselung von Holztafelkonstruktionen 162
  - 6.3 Nachweis der Feuerwiderstandsdauer 162
    - 6.3.1 Tragsicherheit des Restquerschnittes – „Warme Bemessung“ 162
    - 6.3.2 Verbindungsmittel 165
- 7 Rechenbeispiele 169**
  - 7.1 Referenzobjekte 169
  - 7.2 Holzhaus 170
    - 7.2.1 Einwirkungen 170
    - 7.2.2 Sparren – Biegung ohne Normalkraft 174
    - 7.2.3 Sparren – Schub 176
    - 7.2.4 Sparren – Auflagerpressung 177
    - 7.2.5 Druckbeanspruchte Stütze 181
    - 7.2.6 Anschluss Pfette/Stütze 184
    - 7.2.7 Holzbalkendecke 185

## VIII | Inhaltsverzeichnis

7.3	Lagerhalle	187
7.3.1	Einwirkungen	187
7.3.2	Koppelfette – zweiachsige Biegung	190
7.3.3	Koppelfette – Auflagerpressung	193
7.3.4	Binder – Biegung	195
7.3.5	Wandverband – Anschluss Strebe/Stütze	198
7.3.6	Eingespannte Stütze – Tragfähigkeit Verbindungsmittel	203
7.3.7	Eingespannte Stütze – Schubspannungen im Anschlussbereich	208
7.3.8	Eingespannte Stütze – Stabilität	210
7.3.9	Eingespannte Stütze – Gebrauchstauglichkeit	213

<b>Verzeichnis der Normen und Regelwerke</b>	<b>215</b>
--	------------

<b>Verzeichnis der Bildquellen</b>	<b>217</b>
------------------------------------	------------

<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>219</b>
-----------------------------	------------

## Vorwort

Der Holzbau zählt seit einigen Jahren zu den innovativsten Bereichen des Bauwesens. Das betrifft Entwicklungen bei den Konstruktionswerkstoffen und in der Verbindungstechnik sowie die Herstellungstechnologie und die Baustellenlogistik gleichermaßen. Das vorliegende Buch zielt darauf ab, die wesentlichen Kenntnisse und Kompetenzen zu vermitteln, die für den Entwurf, die Bemessung und die Konstruktion von Holztragwerken für typische Bauwerke des Hochbaus erforderlich sind. Ein besonderer Schwerpunkt wird dabei auf die Besonderheiten von Holz und Holzwerkstoffen gegenüber anderen Konstruktionswerkstoffen gelegt. Das betrifft die zahlreichen Vorteile – das vergleichsweise geringe Gewicht und die gute Bearbeitbarkeit des leistungsfähigen Werkstoffs –, aber auch die Herausforderungen, die aus der Materialanisotropie und der Anfälligkeit gegenüber natürlichen Schädlingen herrühren, sowie die Verbindungstechnik. Dabei werden ganz gezielt die wesentlichen Phänomene im Zusammenhang mit normativen Regelungen vorgestellt und anschaulich erläutert. Es werden neben den klassischen statisch-konstruktiven Themen auch baukonstruktive Aspekte in den Blick genommen. In einem abschließenden Kapitel wird die Anwendung der wichtigsten Bemessungsregeln anhand von zwei Referenzprojekten veranschaulicht.

Die Fülle spannender und interessanter Aufgaben, für die mit dem Werkstoff Holz kreative und innovative Lösungen erarbeitet werden können, bringt es mit sich, dass zahlreiche für den modernen Holzbau wichtige Themen nicht berücksichtigt werden konnten. Dazu gehören u. a. Brettsperholz, Verbundbauteile und formschlüssige Verbindungen sowie der Entwurf und die rechnerische Modellierung weitgespannter Hallentragwerke und Brückenkonstruktionen. Diesen Themen wird sich der zweite Band *Ingenieurholzbau – Vertiefung* widmen.

Beide Bände basieren auf Vorlesungsunterlagen, die in den vergangenen Jahren am Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau der Universität Kassel erarbeitet wurden. Carsten Pörtner, Martin Schäfers, Heiko Koch, Lars Eisenhut, Tobias Vogt, Michael Schick und Timo Claus haben in dieser Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiter zum Aufbau des Schwerpunkts „Holzbau“ ganz wesentlich beigetragen.

Bianca Böhmer hat eine Vielzahl handschriftlicher Notizen in Textform gebracht. Christoph Meyer, Simone Otto, Claudia Drebing, Louisa Rippien, Artur Ginz, Lisa McTaggart, Christian Umbach und Christian Hartig haben sich als stu-

dentische Mitarbeiter mit großer Sorgfalt um eine gute und einheitliche grafische Darstellung und die Überprüfung des Layouts gekümmert.

Kassel, im April 2019

*Werner Seim und Johannes Hummel*

## Abkürzungsverzeichnis

### Große lateinische Buchstaben

$A$	Astigkeit, Querschnittsfläche
$\Delta A$	Dübel-Fehlfläche, Verbindungsmittel-Fehlfläche
$A_{fi}$	Restquerschnitt im Brandfall – Querschnittsfläche abzüglich der ideellen Abbrandtiefen
$A_k$	charakteristischer Wert einer außergewöhnlichen Einwirkung
$A_{netto}$	Nettofläche des Querschnitts
$A_{net,t}$	Nettofläche für Zugversagen des Blockquerschnitts (Blockscheren)
$A_{net,v}$	Nettofläche für Schubversagen des Blockquerschnitts (Blockscheren)
$B$	Biegesteifigkeit $B = E \cdot I$
BSH	Brettschichtholz
$C$	Mindeststeifigkeit der Aussteifungskonstruktion
$E$	Elastizitätsmodul
$E_{0,mean}$	Mittelwert des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung
$E_{90,mean}$	Mittelwert des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung
$E_d$	Bemessungswert der Einwirkung (unter normaler Temperatur)
$E_{d,fi}$	Bemessungswert der Einwirkung im Brandfall
$E_k$	charakteristischer Wert der Einwirkung
$E_s$	Elastizitätsmodul von Stahl
$F$	Kraft
$F_{90,d}$	Bemessungswert der Druckkraft an der Außenrippe einer Wandscheibe
$F_{90,Rk}$	charakteristischer Wert der Querkzugtragfähigkeit
$F_{90,Rd}$	Bemessungswert der Querkzugtragfähigkeit
$F_{ax,k}$	charakteristischer Wert der axialen Beanspruchung des Verbindungsmittels
$F_{ax,d}$	Bemessungswert der axialen Beanspruchung des Verbindungsmittels
$F_{ax,Rk}$	charakteristischer Wert der axialen Tragfähigkeit des Verbindungsmittels
$F_{ax,Rd}$	Bemessungswert der axialen Tragfähigkeit des Verbindungsmittels
$F_{bs,Rk}$	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit gegenüber Blockscheren

$F_{f,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels bei Wandelementen
$F_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckkraft in Richtung der Längsachse des Bauteils
$F_{c,90,d}$	Bemessungswert der Druckkraft quer zur Faserrichtung
$F_d$	Bemessungswert einer Beanspruchung, Stabilisierungslast
$F_i$	Kraft auf Verbindungsmittel $i$
$F_{q_1}, F_{q_2}$	Druckkräfte zum Erhalt des Gleichgewichts bei Verbindungen mit Dübeln besonderer Bauart über Formschluss
$F_t$	Zugtragfähigkeit der Schraube gegenüber Stahlversagen
$F_{tens,k}$	charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit der Schraube gegenüber Stahlversagen
$F_{t,d}$	Bemessungswert der axialen Beanspruchung von ausziehfesten Verbindungsmitteln an Zugstößen, Bemessungswert der Zugkraft
$F_{t,d,x}$	Bemessungswert der Kraftkomponente in $x$ -Richtung
$F_{t,d,y}$	Bemessungswert der Kraftkomponente in $y$ -Richtung
$F_{t,d,z}$	Bemessungswert der Kraftkomponente in $z$ -Richtung
$F_{t,0}$	Zugkraft in Richtung der $x$ -Achse
$F_{v,Ed}$	Bemessungswert der Beanspruchung eines Verbindungsmittels auf Abscheren
$F_{v,Rk}$	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels bei Beanspruchung auf Abscheren
$\Delta F_{v,Rk}$	Beitrag aus der Seilwirkung zum charakteristischen Wert der Tragfähigkeit auf Abscheren
$F_{v,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels bei Beanspruchung auf Abscheren, Bemessungswert der Tragfähigkeit der Wandscheibe gegenüber horizontalen Einwirkungen
$F_{v,\alpha,Rd}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Verbindung mit Dübeln besonderer Bauart bei Beanspruchung auf Abscheren im Winkel zur Faser
$F_{v,\alpha,Rd}^b$	Bemessungswert der Tragfähigkeit des (Pass-)Bolzens bei einer Verbindung mit Dübeln besonderer Bauart unter Beanspruchung auf Abscheren im Winkel zur Faser
$F_{v,0,Rk}^c$	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit des Dübels bei einer Verbindung mit Dübeln besonderer Bauart unter Beanspruchung auf Abscheren
$F_{v,\alpha,Rd}^c$	Bemessungswert der Tragfähigkeit des Dübels bei einer Verbindung mit Dübeln besonderer Bauart unter Beanspruchung auf Abscheren im Winkel zur Faser
$F_{x,i}^N$	Kraftkomponente eines Verbindungsmittels in $x$ -Richtung infolge Normalkraftbeanspruchung
$F_{x,i}^M$	Kraftkomponente eines Verbindungsmittels in $x$ -Richtung infolge Biegebeanspruchung
$F_{z,i}^M$	Kraftkomponente eines Verbindungsmittels in $z$ -Richtung infolge Biegebeanspruchung

$F_{z,i}^V$	Kraftkomponente eines Verbindungsmittels in $z$ -Richtung infolge Schubbeanspruchung
$F_{Z,d}$	Bemessungswert der Zugkraft an der Verankerung der Außenrippe einer Wandscheibe
$G$	Schubmodul
$G_k$	charakteristischer Wert der Einwirkung Eigengewicht
$G_{mean}$	Mittelwert des Schubmoduls
$H_{x,i}$	Horizontallast der in $x$ -Richtung orientierten Wand $i$
$H_{y,i}$	Horizontallast der in $y$ -Richtung orientierten Wand $i$
$I$	Flächenträgheitsmoment
$I_p$	polares Flächenträgheitsmoment
$I_s$	Trägheitsmoment einer selbstbohrenden Schraube
$I_t$	Torsionsträgheitsmoment
$I_y$	Flächenträgheitsmoment um die $y$ -Achse
$I_z$	Flächenträgheitsmoment um die $z$ -Achse
KVH	Konstruktionsvollholz
$K, K_{ser}$	Verschiebungsmodul
$K_\varphi$	Drehfedersteifigkeit
LH	Laubholz
$M$	Biegemoment, Schubmittelpunkt
$M_{ap}$	Biegemoment im First eines Satteldachbinders
$M_{ap,d}$	Bemessungswert des Biegemoments im First eines Satteldachbinders
$M_d$	Bemessungswert des Biegemoments
$M_D$	Drillmoment
$M_s$	Biegemoment im Schwerpunkt des Anschlusses
$M_{tor}$	Torsionsmoment am Auflager von Dachbindern
$M_{tor,d}$	Bemessungswert des Torsionsmoments am Auflager von Dachbindern
$M_{y,Rk}$	charakteristischer Wert des Fließmoments des Verbindungsmittels
$N$	Normalkraft
$N_d$	Bemessungswert der Normalkraft
$N_{pl,k}$	plastische Normalkrafttragfähigkeit einer selbstbohrenden Schraube
$N_{ki,k}$	Knicklast einer selbstbohrenden Schraube
$N_s$	Normalkraft im Schwerpunkt des Anschlusses
NH	Nadelholz
OSB	Oriented Strand Board
$P$	Last
$P_{i,z}$	Resultierende Kraft in $z$ -Richtung in Höhe der Verbindungsmittelreihe $i$
$Q_k$	charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung
$Q_{k,q}$	charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung Nutzung
$Q_{k,s}$	charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung Schnee
$Q_{k,w}$	charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung Wind
$R_d$	Bemessungswert des Widerstandes
$R_k$	charakteristischer Wert des Widerstandes
$S$	Schwerpunkt

$S_y$	Statisches Moment um die $y$ -Achse
$T$	Torsionssteifigkeit
$V$	Volumen
$V_d$	Bemessungswert der Querkraft
$V_{red}$	reduzierte Querkraft
$V_s$	Schubkraft im Schwerpunkt des Anschlusses
$V_z$	Querkraft in $z$ -Richtung
$W$	Widerstandsmoment
$W_{ap,netto}$	Widerstandsmoment des Firstquerschnitts, ggf. unter Abzug von Fehlfächen durch eingeklebte Verstärkungen
$W_{netto}$	Widerstandsmoment des Nettoquerschnitts
$W_{erf}$	erforderliches Widerstandsmoment beim Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)
$W_{fi}$	Widerstandsmoment des Restquerschnitts nach Berücksichtigung der ideellen Abbrandtiefe
$W_x$	Einwirkende Horizontalkraft in $x$ -Richtung
$W_y$	Widerstandsmoment für Biegung um $y$ -Achse

## Kleine lateinische Buchstaben

$a$	Abstand bzw. Überstand
$a_1$	Verbindungsmittelabstand in Faserrichtung, Beiwert zur Ermittlung der Kiplänge
$a_2$	Verbindungsmittelabstand senkrecht zur Faserrichtung, Beiwert zur Ermittlung der Kiplänge
$a_3$	Randabstand von Verbindungsmitteln in Faserrichtung
$a_4$	Randabstand von Verbindungsmitteln senkrecht zur Faserrichtung
$a_{fi}$	Erhöhungsmaß für die Feuerwiderstandsklassen R30/R60
$a_r$	Rippenabstand
$b$	Querschnittsbreite des Bauteils, Breite einer Wandscheibe
$b_{ef}$	effektive Querschnittsbreite, effektive Scheibenhöhe
$b_{fi}$	Breite des Restquerschnitts nach Berücksichtigung der ideellen Abbrandtiefe
$b_i$	Breite der Öffnung $i$ in der Beplankung einer Holztafelwand
$b_{net}$	lichter Abstand zwischen den Rippen bei Holztafelwänden
$b_{st}$	Breite ungeschützter innen liegender Stahlbleche
$c$	Breite des Firstbereiches, Abminderungsfaktor für besonders schlanke Wände
$c_h$	Bettungsziffer für selbstbohrende Schrauben gegenüber seitlichem Ausweichen
$d$	Verbindungsmitteldurchmesser
$d_a$	Außendurchmesser von Unterlegscheiben
$d_c$	Durchmesser eines Dübels besonderer Bauart
$d_{ef}$	ideelle Abbrandtiefe

$d_h$	Durchmesser des Schraubenkopfes oder Durchmesser der Unterlegscheibe
$d_i$	Durchmesser von Ast $i$
$e_x$	Abstand der Wirkungachsen der Einwirkungen vom Steifigkeitsmittelpunkt in $x$ -Richtung
$e_y$	Abstand der Wirkungachsen der Einwirkungen vom Steifigkeitsmittelpunkt in $y$ -Richtung
$f_{ax,d}$	Bemessungswert des Ausziehparameters
$f_{ax,k}$	charakteristischer Wert des Ausziehparameters
$f_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung
$f_{c,0,k}$	charakteristischer Wert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung
$f_{c,90,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung
$f_{c,90,k}$	charakteristischer Wert der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung
$f_{c,\alpha,k}$	charakteristischer Wert der Druckfestigkeit für Beanspruchung im Winkel zur Faser
$f_d$	Bemessungswert der Festigkeit
$f_{d,\bar{f}_i}$	Bemessungswert der Festigkeit im Brandfall
$f_{h,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit
$f_{h,0,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung
$f_{h,1,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit für Querschnitt 1
$f_{h,2,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit für Querschnitt 2
$f_{h,\alpha,k}$	charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit unter einem Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung
$f_{head,k}$	charakteristischer Wert des Kopfdurchziehparameters
$f_k$	charakteristischer Wert der Festigkeit, Drahtzugfestigkeit (Nagel oder Klammer)
$f_{m,d}$	Bemessungswert der Biegefestigkeit
$f_{m,k}$	charakteristischer Wert der Biegefestigkeit
$f_{t,0,d}$	Bemessungswert der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung
$f_{t,0,k}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung
$f_{t,90,d}$	Bemessungswert der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung
$f_{t,90,k}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung
$f_{v,d}$	Bemessungswert der Schubfestigkeit
$f_{v,k}$	charakteristischer Wert der Schubfestigkeit
$f_{u,k}$	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit des Verbindungsmittels
$g$	Linienlast Eigengewicht
$g_x$	Linienlast Eigengewicht bezogen auf die $x$ -Achse des Bauteils
$g_z$	Linienlast Eigengewicht bezogen auf die $z$ -Achse des Bauteils
$h$	Querschnittshöhe des Bauteils, Höhe des Wandelements
$h_A$	Trägerhöhe am Auflager
$h_{ap}$	Trägerhöhe im Firstbereich
$h_c$	Höhe eines Dübels besonderer Bauart
$h_e$	Verbindungsmittelabstand vom Bauteilrand, Einlass-/Einpresstiefe
$h_{ef}$	effektive Bauteilhöhe

$h_i$	Höhe der Öffnung $i$ in der Beplankung einer Holztafelwand
$h_{fi}$	Höhe des Restquerschnitts nach Berücksichtigung der ideellen Abbrandtiefe
$i$	Trägheitsradius, Neigung des Anschnitts
$i_m$	Trägheitsradius für Kippen
$k_1, k_2, k_3$	Beiwerte zur Berücksichtigung von Abweichungen von der Rohdichte und den Mindestholzdicken auf die Tragfähigkeit von Dübeln besonderer Bauart
$k_{\alpha,c}$	Beiwert zur Berücksichtigung des Kraft-Faser-Winkels beim Dübel
$k_c$	Knickbeiwert
$k_{c,90}$	Querdruckbeiwert
$k_{cr}$	Beiwert zur Bestimmung der effektiven Breite
$k_{crit}$	Beiwert zur Berücksichtigung der Vorkrümmung des Binders
$k_{def}$	Verformungsbeiwert
$k_{fi}$	Beiwert zur Umrechnung der Festigkeit im Brandfall
$k_l$	Beiwert zur Berücksichtigung der Neigung des Satteldachbinders auf die Biegespannung
$k_{m,\alpha}$	Beiwert zur Abminderung der Biegefestigkeit bei angeschnittener Faser
$k_{mod}$	Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt
$k_{mod,fi}$	Modifikationsbeiwert im Brandfall
$k_{pl}$	Beiwert zur Berücksichtigung des Plattenbeulens und des Einflusses von Nebenspannungen
$k_v$	Abminderungsbeiwert bei Ausklinkungen
$k_{wx,i}$	Ersatz-Federsteifigkeit einer in $x$ -Richtung orientierten Wand
$k_{wy,i}$	Ersatz-Federsteifigkeit einer in $y$ -Richtung orientierten Wand
$l$	Bauteillänge bzw. Spannweite
$l'$	Höhe der Stütze zwischen elastischer Einspannung und Stützenkopf
$l_{ap}$	Länge zwischen Auflager und First
$l_1, l_2$	Spannweiten
$l_{ef}$	effektive Länge, Knicklänge, Kiplänge, Verankerungslänge, Einbinde-/Einschraubtiefe
$l_k$	Länge einer Auskragung
$l_{v,i}$	Länge der auf Schub beanspruchten Bereiche beim Blockscheren
$l_{t,i}$	Länge der auf Zug (in Faserrichtung) beanspruchten Bereiche beim Blockscheren
$m$	Masse
$m_0$	Masse der darrgetrockneten Holzprobe
$m_u$	Masse der feuchten Holzprobe
$n$	Anzahl von Bauteilen und Verbindungsmitteln
$n_{ef}$	wirksame Anzahl von Verbindungsmitteln
$n_s$	Anzahl der Scherflächen im Anschluss
$n_x$	Anzahl der Verbindungsmittel in lokaler $x$ -Richtung
$n_z$	Anzahl der Verbindungsmittel in lokaler $z$ -Richtung
$q$	Linienlast veränderliche Einwirkung
$q_d$	Linienlast Bemessungswert, Stabilisierungslast aus Dachbindern
$q_{s,x}$	Linienlast Schnee bezogen auf die $x$ -Achse des Bauteils

$q_{s,z}$	Linienlast Schnee bezogen auf die $z$ -Achse des Bauteils
$q_w$	Linienlast Wind
$r_{in}$	kleinster (innerster) Radius des gekrümmten Bauteils
$s$	Abstand der Verbindungsmittel bei Holztafelwänden
$s'$	dynamische Steifigkeit gegenüber Trittschall
$s_d$	wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke
$s_{x,i}$	Abstand der Wand $i$ vom Steifigkeitsmittelpunkt in $x$ -Richtung
$s_{y,i}$	Abstand der Wand $i$ vom Steifigkeitsmittelpunkt in $y$ -Richtung
$t$	Bauteildicke, Dicke der Lamelle, Dicke der Beplankung, Dauer der Brandbeanspruchung
$t_1$	Dicke des Seitenholzes
$t_2$	Dicke des Mittelholzes
$t_{ef}$	wirksame Höhe beim Blockscheren
$t_{pen}$	Einschlagtiefe von Verbindungsmitteln
$u$	Holzfeuchte, Verschiebung
$u_\varphi$	Verschiebung am Stützenkopf infolge Stützenverdrehung
$v$	seitliche Verschiebung infolge Knickens
$w$	Verschiebung in $z$ -Richtung
$w_{1\text{kN}}$	Durchbiegung unter einer Einzellast von 1 kN in Feldmitte eines Einfeldträgers
$w_{ap}$	größte Durchbiegung am First ohne Abzug der Überhöhung
$w_c$	Überhöhung
$w_{creep}$	Kriechverformung
$w_{fin}$	Enddurchbiegung
$w_{inst}$	Anfangsdurchbiegung
$w_{inst,G}$	Anfangsdurchbiegung infolge ständiger Lasten
$w_{inst,Q}$	Anfangsdurchbiegung infolge veränderlicher Lasten
$w_{net,fin}$	Enddurchbiegung ohne Berücksichtigung einer Überhöhung
$w_H$	horizontale Auflageverschiebung bei einem gekrümmten Träger
$x_i$	Abstand des Verbindungsmittels $i$ vom Anschlusschwerpunkt in lokaler $x$ -Richtung
$x_s$	$x$ -Koordinate des Steifigkeitsmittelpunkts
$y_s$	$y$ -Koordinate des Steifigkeitsmittelpunkts
$z_i$	Abstand des Verbindungsmittels $i$ vom Anschlusschwerpunkt in lokaler $z$ -Richtung

## Kleine griechische Buchstaben

$\alpha$	Winkel, Kraft-Faser-Winkel, Verhältnis Resthöhe zu Trägerhöhe, Winkel zwischen Faserrichtung und Schraubenachsen, Dachneigung, Faseranschnittswinkel
$\beta$	Winkel, Knicklängenbeiwert, Verhältnis der Lochleibungsfestigkeiten
$\beta_n$	ideelle Abbrandrate
$\gamma$	Winkel

$\gamma_G$	Teilsicherheitsbeiwert für eine ständige Einwirkung
$\gamma_m$	Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeit
$\gamma_{m,fi}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Festigkeit im Brandfall
$\gamma_Q$	Teilsicherheitsbeiwert für eine veränderliche Einwirkung
$\delta$	Winkel
$\eta$	Ausnutzungsgrad
$\sigma_0$	Spannung in Richtung der Faser
$\sigma_{90}$	Spannung quer zur Richtung der Faser
$\sigma_B$	Biegespannung
$\sigma_D$	Druckspannung
$\sigma_{c,0}$	Druckspannung in Faserrichtung des Holzes
$\sigma_{c,90}$	Druckspannung senkrecht zur Faserrichtung des Holzes
$\sigma_{c,\alpha}$	Druckspannung im Winkel zur Faserrichtung des Holzes ( $0^\circ > \alpha > 90^\circ$ )
$\sigma_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckspannung in Faserrichtung
$\sigma_{c,90,d}$	Bemessungswert der Druckspannung senkrecht zur Faserrichtung
$\sigma_{c,\alpha,d}$	Bemessungswert der Druckspannung im Winkel zur Faserrichtung des Holzes ( $0^\circ > \alpha > 90^\circ$ )
$\sigma_{d,fi}$	Bemessungswert der Spannungen im Brandfall
$\sigma_{t,0}$	Zugspannung in Faserrichtung des Holzes
$\sigma_{t,0,d}$	Bemessungswert der Zugspannung in Faserrichtung
$\sigma_{t,90}$	Zugspannung quer zur Faserrichtung des Holzes
$\sigma_{t,90,d}$	Bemessungswert der Zugspannung quer zur Faserrichtung des Holzes
$\sigma_m$	Biegespannung
$\sigma_{m,d}$	Bemessungswert der Biegespannung
$\sigma_{m,0,d}$	Bemessungswert der Längsbiegespannung bei parallelgurtigen Trägern
$\sigma_{m,\alpha,d}$	Bemessungswert der Längsbiegespannung am angeschnittenen Rand
$\sigma_{m,y,d}$	Bemessungswert der Biegespannung infolge Biegung um die $y$ -Achse
$\sigma_{m,z,d}$	Bemessungswert der Biegespannung infolge Biegung um die $z$ -Achse
$\lambda$	Schlankheit
$\bar{\lambda}_k$	Schlankheitsgrad einer selbstbohrenden Schraube gegenüber Knicken
$\lambda_{rel,c}$	Knickschlankheit
$\lambda_{rel,m}$	Kippschlankheit
$\tau$	Schubspannung
$\tau_d$	Bemessungswert der Schubspannung
$\tau_{xz}$	Schubspannung rechtwinklig zur Balkenachse
$\tau_{zx}$	Schubspannung parallel zur Balkenachse
$\tau_{yz,d}$	Bemessungswert der Schubspannung in Richtung der $y$ -Achse
$\tau_{xz,d}$	Bemessungswert der Schubspannung in Richtung der $z$ -Achse
$\mu_m$	Ausnutzungsgrad bei Pult- und Satteldachbindern für Biegung

$\mu_z$	Ausnutzungsgrad bei Pult- und Satteldachbindern für Querkzug
$\psi_0$	Kombinationsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
$\psi_1$	Kombinationsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
$\psi_2$	Kombinationsbeiwert für veränderliche Einwirkungen
$\rho$	Rohdichte
$\rho_k$	charakteristischer Wert der Rohdichte
$\rho_m$	Mittelwert der Rohdichte
$\omega_{gl}$	Ausgleichsfeuchte
$\vartheta$	Drehwinkel der Stabachse/Verdrillung



# 1

## Holz als Konstruktionswerkstoff

### 1.1 Bauen mit Holz – Vorteile und Herausforderungen

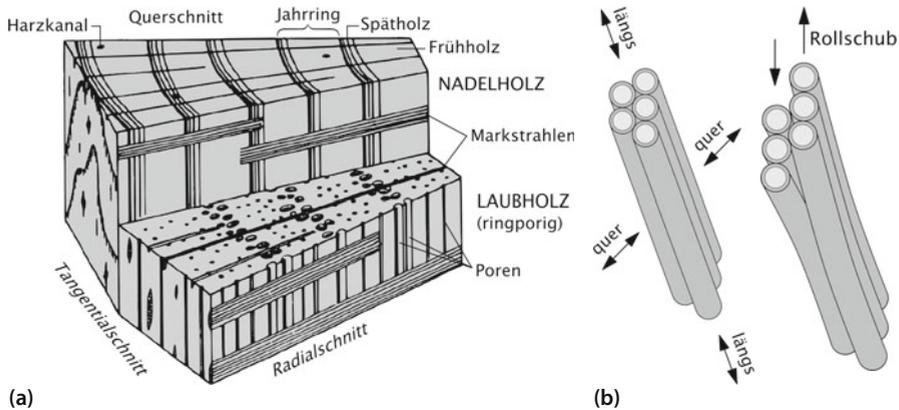
Der Holzbau zählt neben dem Mauerwerksbau aus natürlichen Steinen zu den ältesten Bauweisen der Menschheit. Holz war bis zur industriellen Herstellung von Stahlerzeugnissen der einzige Baustoff, der für stabförmige auf Biegung beanspruchte Bauteile zur Verfügung stand. Im Verlauf der Geschichte entwickelten die Zimmerleute eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für diesen leicht zu bearbeitenden Werkstoff. Holz wurde und wird für Dachkonstruktionen, Fachwerkbauten, Brücken, Schiffe und vieles mehr verwendet. Der Baustoff Holz ist in den meisten Regionen in Mittel- und Nordeuropa lokal vorhanden und kann ohne lange Transportwege vom Wald über das Sägewerk zum Einsatzort gebracht werden. Holz ist der einzige nachwachsende Rohstoff, der für Baukonstruktionen und Tragwerke genutzt wird, und verfügt über ein hervorragendes Potenzial für eine optimierte Kaskadennutzung, wie in Abb. 1.1 schematisch veranschaulicht wird.

In Deutschland sind ca. 30 % der Fläche bewaldet. Die Wälder speichern durch die Fotosynthese große Mengen  $\text{CO}_2$ . Durch Verbrennung oder Verrottung des Holzes wird so viel  $\text{CO}_2$  freigesetzt, wie beim Wachstum aus der Atmosphäre aufgenommen wurde. Wird Holz als Baustoff in Gebäuden oder anderen Bauwerken eingesetzt, so bleibt das  $\text{CO}_2$  über die gesamte Nutzungsdauer des Gebäudes gebunden. Die Bewirtschaftung der Wälder folgt dem Prinzip der Nachhaltigkeit, d. h., es wird pro Jahr nur so viel Holz entnommen, wie in dieser Zeit nachwächst.

Holz, als natürlicher Werkstoff, kann unter bestimmten Umständen durch Pilze oder Insekten zerstört werden. Somit hängt die Nutzungsdauer von Bauwerken aus Holz ganz entscheidend von der Ausführungsart und dem richtigen Holzschutz ab. Dass Holzbauwerke bei richtiger Konstruktion und Pflege durchaus mehrere hundert Jahre überdauern können, zeigen die in großer Anzahl in Deutschland erhaltenen mittelalterlichen Dachkonstruktionen und Fachwerkhäuser, die teilweise über 500 Jahre alt sind.

Ein wichtiges Merkmal des Holzbaus ist die Verbindungstechnik. Neben den zimmermannsmäßigen Verbindungen entwickelten sich im 20. Jahrhundert zunehmend neue Verbindungstechniken im Holzbau. Die Entwicklung der Klebtechnik und die damit verbundene Möglichkeit, Holzquerschnitte unabhängig von den Abmessungen der Bäume herstellen zu können, hat zu einer ständigen Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten des Holzbaus geführt. Heute wer-





**Abb. 1.2** (a) Holzstruktur von Nadel- und Laubholz im Vergleich; (b) Röhren-Modell mit unterschiedlichen Beanspruchungen.

### 1.2.1 Einfluss der Faserrichtung

Holz ist ein anisotroper Werkstoff. Dies lässt sich sehr gut an der Zellstruktur des Holzes (siehe Abb. 1.2) erkennen. Bei Nadelholz bilden die röhrenförmigen dickwandigen Tracheiden (Spätholz) das tragende Element; sie verleihen dem Holz seine Festigkeit. Die Festigkeiten des Holzes sind deshalb in Faserrichtung am größten. Senkrecht zur Faserrichtung sind die Festigkeiten hingegen relativ gering. Der verhältnismäßig einfache und regelmäßige Aufbau des Holzes kann als Röhrenmodell – ähnlich einem Bündel aus Strohhalmen – betrachtet werden (vgl. Abb. 1.2b und Abb. 1.3). Anhand des Röhrenmodells lassen sich die unterschiedlichen Versagensarten erklären.

- Zug:** In Längsrichtung versagen die einzelnen Fasern erst bei Erreichen ihrer Zugfestigkeit. In Querrichtung können die Fasern leicht auseinandergezogen werden.
- Druck:** Eine Druckbeanspruchung in Längsrichtung führt bei einer vergleichsweise hohen Last zum Ausknicken der einzelnen Fasern. In Querrichtung werden die Fasern schon unter vergleichsweise geringer Beanspruchung gequetscht.
- Biegung:** Bei der Biegung eines Balkens werden Zug- und Druckfestigkeit in Längsrichtung mobilisiert.
- Schub:** Eine Schubbeanspruchung in Faserrichtung ist günstiger als eine Rollschubbeanspruchung senkrecht zur Faserrichtung.

### 1.2.2 Festigkeiten von Vollholz

Entscheidend für die Festigkeit des Holzes ist, wie dicht die Fasern „gepackt“ sind. In diesem Zusammenhang ist die Rohdichte des Holzes eine wichtige Referenzgröße. Diese wird an darrtrockenen Proben bestimmt (vgl. Abschn. 1.2.4).

$$\rho = \frac{m_0 \text{ [kg]}}{V \text{ [m}^3\text{]}} \quad (1.1)$$