

Vorwort zur 10. Auflage

Diese inzwischen 10. Auflage des Holzbau-Taschenbuchs erscheint zu Ehren und im Andenken an die beiden früheren Herausgeber, die Professoren *Robert von Halász* und *Claus Scheer*. Beide haben an exponierter Stelle den Holzbau über Jahrzehnte begleitet und geprägt. In besonderem Maße widmen wir diese Ausgabe dem leider viel zu früh verstorbenen Kollegen *Claus Scheer*. Die Neuauflage hätten wir ihm sehr gern zu einem runden Geburtstag überreicht. Wir danken ihm besonders für die wertvollen inhaltlichen Impulse zu Beginn der Überarbeitung dieser Auflage.

Beide hochverehrten Kollegen wären wohl über die heutige Entwicklung im Bereich des Holzbaus sehr erfreut. Standen die ersten Ausgaben des Holzbau-Taschenbuchs noch unter dem Eindruck der infolge des Zweiten Weltkriegs zerstörten Wälder und einer ausgesprochenen Holzknappheit sowie der damit verbundenen Einschränkung des Holzbaus auf Konstruktionen, für die er aufgrund seines herausragenden Leistungsgewichts besonders geeignet ist – z. B. weit gespannte Dachkonstruktionen –, haben wir es heute aufgrund der hervorragenden Waldwirtschaft der letzten Jahrzehnte eher mit einem Überangebot an Holz auf dem Markt zu tun. Gleichzeitig erlebt der Holzbau weltweit eine Renaissance, da seine positiven umweltrelevanten Eigenschaften sich inzwischen einer hohen gesellschaftlichen Akzeptanz erfreuen, allen voran die durch die Speicherung des Kohlenstoffs erzeugte atmosphärische CO₂-Senkung und der geringe Primärenergieaufwand bei der Herstellung. Dies führt u. a. weltweit zum Bau von ersten Hochhäusern aus Holz und zur vielfältigen Verwendung von Holz in vielgeschossigen Bauwerken aller Art. Der Fortschritt der letzten zwei Jahrzehnte basiert zudem auf einer rasanten Entwicklung von Verbindungsmitteln, Holzbaustoffen und Fertigungstechnologien, die den Holzbau in einigen Bereichen des Bauwesens technologisch weit nach vorn, wenn nicht an die Spitze gebracht haben.

Diese Veränderungen sind hochdynamisch und werden uns auch in den nächsten Jahren begleiten, u. a. verursacht durch die notwendige Umstellung von der bisherigen Hauptbaumart Fichte auf die zunehmende Verwendung von Laubhölzern im Bauwesen. Denn gerade die Fichte ist derzeit sehr stark von den durch den Klimawandel bedingten Veränderungen der Wuchsbedingungen betroffen.

Mit Blick auf diese Randbedingungen freuen wir uns sehr, Ihnen als neue Herausgeber des Holzbau-Taschenbuchs zusammen mit dem Verlag und allen Co-Autoren

diese nun vollständig überarbeitete Neuauflage vorstellen zu können. Wir bedanken uns für die hervorragende Unterstützung durch unsere Co-Autoren, mit deren Hilfe der derzeitige Stand der Technik im Holzbau aus nationalem und internationalem Blickwinkel abgebildet werden konnte.

Da die Entwicklung auch in Zukunft sicher dynamisch bleiben wird, hoffen wir auf eine deutlich kürzere Zeitspanne bis zur nächsten Neuauflage des Holzbau-Taschenbuchs.

Wir wünschen Ihnen viel Freude und Gewinn beim Lesen und freuen uns auf Kritiken und Anregungen.

Mandy Peter und Stefan Winter

München, im September 2020

Tab. 4.6 Vollholz (VH) ohne Behandlung mit HSM – Anwendungsbereiche nach DIN 68800-1.

Produkt	KZS	DK	Verwendbar in		Hinweise
			NKL	GK	
Vollholz aus Fichte/Tanne (Fi/Ta)	mit und ohne KZS	4	1, 2	0, 1	GK 1 nur für techn. getr. Holz (Trocknung bei $T > 55^\circ\text{C}$ über 48 h)
Vollholz aus Kiefer (Ki)	ohne KZS	3–4	1, 2, (3)	0, 1, 2, (3.1)	Für Ki-Kernholz kann DK 3 angenommen werden → in GK 3.1 verwendbar.
	mit KZS	3–4	1, 2	0, 1, 2	Einschränkung der Verwendbarkeit durch KZS-Verklebung
Vollholz aus Lärche (Lä)	ohne KZS	3–4	1, 2, 3	0, 1, 2, 3.1 (3.2)	Farbkernholz Lä kann DK 3 zugeordnet werden → in GK 3.1 verwendbar Sibir. Lä mit $\rho > 700 \text{ kg/m}^3$ → in GK 3.2 verwendbar
	mit KZS	3–4	1, 2	0, 1, 2	Einschränkung der Verwendbarkeit durch KZS-Verklebung
Vollholz aus Douglasie (Dou)	ohne KZS	Nordam.: 3, kultiviert in EU: 3–4	1, 2, 3	0, 1, 2, 3.1	Für Dou-Kernholz kann DK 3 angenommen werden → in GK 3.1 verwendbar
	mit KZS		1, 2	0, 1, 2	Einschränkung der Verwendbarkeit durch KZS-Verklebung

Die Tab. 4.6–4.9 stellen die möglichen Anwendungsbereiche von Holz und Holzprodukten zusammen, in denen diese ohne Behandlung mit Holzschutzmitteln eingesetzt werden können. Dabei sind jeweils die grundsätzlichen baulichen Maßnahmen nach Abschnitt 5, DIN 68800-2, stets zu beachten.

4.8 Robustheit von Holzbaukonstruktionen

Der Begriff der Robustheit stammt vom lateinischen „robustus“ ab, dessen Ursprung wiederum das Wort „robur“ ist. Bezeichnenderweise wird dieses Wort neben dem Begriff „Kraft“ oder „Stärke“ auch mit dem Wort „Hart- oder Eichenholz“ übersetzt. Somit gilt zumindest Hart- oder Eichenholz grundsätzlich als Inbegriff der Robustheit. Gemeint ist damit die Fähigkeit eines Systems oder eines Materials, Veränderungen ohne Anpassung seiner anfänglich stabilen Struktur standzuhalten. Im Sinne von Konstruktionen in Holzbauweise bedeutet Robustheit im Wesentlichen

Tab. 4.7 Balkenschichtholz (BaSH, z. B. Duobalken/Triobalken) ohne Behandlung mit HSM – Anwendungsbereiche nach DIN 68800-1.

Produkt	DK	Verwendbar in		Hinweise
		NKL	GK	
Balkenschichtholz aus Fichte/Tanne	4	1, 2	0, 1	Einschränkung der Verwendbarkeit durch Verklebung gem. DIN EN 14080
Balkenschichtholz aus Kiefer	3–4	1, 2	0, 1, 2	Für Ki-Farbkernholz kann DK 3 angenommen werden → in GK 3.1 verwendbar
Balkenschichtholz aus Lärche	3–4	1, 2	0, 1, 2	Einschränkung der Verwendbarkeit durch Verklebung gem. DIN EN 14080
Balkenschichtholz aus Douglasie	3–4	1, 2	0, 1, 2	

Tab. 4.8 Brettschichtholz (BSH) ohne Behandlung mit HSM – Anwendungsbereiche nach DIN 68800-1.

Produkt (Brettschichtholzart)	DK	Verwendbar in			Hinweise
		NKL	GK		
Brettschichtholz aus Fichte/Tanne (Fi/Ta)	4	1, 2	0, 1		Lamellendicke bis 45 mm, alle Klebstoffe Typ I einsetzbar
Brettschichtholz aus Kiefer (Ki)	3–4	1, 2	0, 1, 2, (3.1)		Lamellendicke bis 45 mm; nur Klebstoffe Typ I einsetzbar; Für Ki-Farbkernholz kann DK 3 angenommen werden → in GK 3.1 verwendbar
Brettschichtholz aus Lärche (Lä)	3–4	1, 2, 3	0, 1, 2, 3.1		Lamellendicke bis 35 mm; nur Klebstoffe Typ I einsetzbar
Brettschichtholz aus Douglasie (Dou)	3–4	1, 2, 3	0, 1, 2, 3.1		
Brettschichtholz aus Buche (Bu)	4	2	0, 1		nach abZ

die Kompensation von möglicherweise ungeplanten Feuchtebeanspruchungen, die durch eine zeitliche Begrenzung nicht zu Schädigungen des Bauteils bzw. der Konstruktion führen. Dabei lassen sich allgemein zwei Gruppen von Bauteilen und Konstruktionen bilden:

- geschlossene oder überdachte Bauteile und Konstruktionen der Gebrauchsklassen 0, 1 und 2,
- offene Bauteile und Konstruktionen mit direkter Bewitterung der Gebrauchsklassen 3.1 und 3.2.

Bauteile und Konstruktionen der Gebrauchsklassen 4 und 5 sind per Definition ohnehin einer vorwiegenden oder ständigen Befeuchtung ausgesetzt und müssen somit für diese Belastungen ausgelegt sein.

Tab. 4.9 Holzwerkstoffe (HWSt) für tragende Zwecke im Bauwesen – Anwendungsbereiche nach DIN EN 13986.

Holzwerkstoff	Klasse	Verwendbar in		GK
		NKL	HWSt-Klasse nach DIN EN 13986 ^{a), b)}	
Massivholzplatten	SWP/1 tragend	1	Trockenbereich	0, 1
	SWP/2 tragend	2	Feuchtbereich	2
	SWP/3 tragend	3	Außenbereich	3.1, 3.2
Sperrholz	EN 636-1 „S“	1	Trockenbereich	0, 1
	EN 636-2 „S“	2	Feuchtbereich	2
	EN 636-3 „S“	3	Außenbereich	3.1, 3.2
Furnierschichtholz	LVL/1	1	Trockenbereich	0, 1
	LVL/2	2	Feuchtbereich	2
	LVL/3	3	Außenbereich	3.1, 3.2
OSB-Platten	OSB/2	1	Trockenbereich	0, 1
	OSB/3	2	Feuchtbereich	2
	OSB/4	2	Feuchtbereich	2
kunstharzgebundene Spanplatte	P4	1	Trockenbereich	0, 1
	P5	2	Feuchtbereich	2
	P6	2	Feuchtbereich	2
	P7	2	Feuchtbereich	2
zementgebundene Spanplatte	Klasse 1	3	Außenbereich	3.1, 3.2
	Klasse 2	3	Außenbereich	3.1, 3.2
harte Faserplatte	HB.LA	1	Trockenbereich	0, 1
	HB.HL.A1	2	Feuchtbereich	2
	HB.HL.A2	2	Feuchtbereich	2
mittelharte Faserplatte	MBH.LA1	1	Trockenbereich	0, 1
	MBH.LA2	1	Trockenbereich	0, 1
	MBH.HLS1	2	Feuchtbereich	2
	MBH.HLS2	2	Feuchtbereich	2
poröse Faserplatte	SB.LS	1	Trockenbereich	0, 1
	SB.HLS	2	Feuchtbereich	2
MDF-Platten	MDF.LA	1	Trockenbereich	0, 1
	MDF.HLS	2	Feuchtbereich	2

a) Feuchtbereich bezieht sich auf die Nutzungsklassen nach DIN EN 1995-1-1 und nicht auf die Gebrauchsklassen nach DIN 68800.

b) Verwendung im Außenbereich nur bei Erfüllung der Kriterien für tragende Bauteile und nur mit bauaufsichtlichem Verwendbarkeitsnachweis für den vorgesehenen Verwendungszweck.

Unter den geschlossenen oder überdachten Konstruktionen können folgende Arten subsumiert werden:

- allseitig abgedeckte bzw. bekleidete Holzbauteile,
- sichtbar und kontrollierbar bleibende Hölzer in Wohnräumen und klimatisch wohnraumähnlichen Umgebungen sowie in unbeheizten Dachräumen,
- Außenbauteile unter ausreichend wirksamen Überdachungen und Abdeckungen.

Als offene Bauteile und Konstruktionen mit direkter Bewitterung lassen sich die folgenden Arten definieren:

- Balkonkonstruktionen sowie Brücken und Stege ohne Überdachung oder Abdeckungen,
- Stützen und Riegel im Außenbereich, die sich nicht im Bereich von schützenden Überdachungen bzw. Dachüberständen befinden.

Die wesentlichen Voraussetzungen für eine ausreichende Robustheit von Bauteilen und Konstruktionen in Holzbauweise sind im Rahmen der grundsätzlichen baulichen Maßnahmen nach Abschnitt 8.1.3, DIN 68800-2, formuliert. Dies sind zusammengefasst die

- Vermeidung von Tauwasser aus Wasserdampfdiffusion und Konvektionsprozessen,
- Fernhaltung oder schnelle Ableitung von Niederschlagswasser.

4.9 Robustheit von geschlossenen Bauteilen und Konstruktionen

Die vorherige Fassung der DIN 68800 ließ für bestimmte Konstruktionen eine Einbaufeuchte bis zu 35 % zu, sodass in der Vergangenheit besondere Maßnahmen beachtet werden mussten, um die Abgabe dieser überschüssigen Feuchte aus der Konstruktion zu ermöglichen. Dies war z. B. die außenseitige Anordnung von diffusionsoffenen Abdeckungen mit einem Diffusionswiderstand von $s_d \leq 0,2$ m. Gemäß der aktuellen Fassung der Norm darf in den Gebrauchsklassen GK 0, 1, 2 und 3.1 die Einbaufeuchte maximal 20 % betragen. Dies begünstigt die Robustheit von Holzkonstruktionen erheblich. So ist es z. B. nicht mehr erforderlich, dass bei neuen Konstruktionen eine hohe Anfangsfeuchte nach dem Einbau abgebaut werden muss. Unabhängig davon hat sich in den vergangenen 20 Jahren für den Tauwasserschutz bei Konstruktionen in Holzbauart eine möglichst diffusionsoffene Konstruktionsweise von Wänden und Dächern weitgehend durchgesetzt. Dabei steht eine möglichst hohe Trocknungsreserve gegenüber unplanmäßigen Befeuchtungen – insbesondere solche durch Wasserdampfkonnektion – im Vordergrund, um die Robustheit dieser Bauweise zu gewährleisten.

Im aktuellen Baugeschehen sind unbelüftete und voll gedämmte Außenbauteile in Holzbauweise zur Normalität geworden. Insbesondere bei Flachdächern, die au-

ßenseitig dampfdichte Abdichtungen oder Verblechungen aufweisen, waren nach den Erkenntnissen aus Wissenschaft und Praxis alte bauphysikalische Regeln dringend zu hinterfragen. Bis zur Neuerscheinung der DIN 68800 im Jahr 2011/2012 und der DIN 4108-3 im Jahr 2014 galt zumindest normativ die Regel:

außen dicht = innen noch dichter .

Insbesondere hier waren Wissenschaft und Praxis den geltenden Regelungen deutlich voraus und folgten den Erkenntnissen, dass solchen Bauteilen eine sommerliche Rücktrocknung zur Raumseite hin ermöglicht werden muss. Dies ist nun wesentlicher Bestandteil der Regelungen in den aktuellen Fassungen der genannten Normen.

4.9.1 Die „Dichtheitsregeln“ – Diffusionswiderstände der Bauteilschichten in mehrschichtigen Konstruktionen in Holzbauweise

Grundsätzlich ist nach Abschnitt 5.2.4, DIN 68800-2, eine unzuträgliche Veränderung des Feuchtegehalts durch Tauwasser aus Wasserdampfdiffusion oder Wasserdampfkonvektion zu verhindern. Direkte Konvektion von feuchtehaltiger Luft in die Hohlräume von Bauteilen in Holztafelbauweise wird durch Einhaltung der Regeln nach DIN 4108-7 (Luftdichtheit von Gebäuden) ausreichend eingeschränkt. Die Tauwasserfreiheit durch Wasserdampfdiffusion ist durch einen Nachweis nach DIN 4108-3 (Glaser-Verfahren) oder durch eine hygrothermische Berechnung nach DIN 15026 sicherzustellen.

Beim Nachweis nach dem Glaser-Verfahren ist bei der Berechnung zur Berücksichtigung eines konvektiven Feuchteintrags aus praxisüblichen Leckagen der Luftdichtheitsschicht und von Anfangsfeuchten der Materialien eine zusätzliche rechnerische Trocknungsreserve (TR) einzubeziehen. Diese beträgt $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ a})$ bei Dächern und $100 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ a})$ bei Wänden und Decken. Damit müssen sich bei der Subtraktion der nach dem Glaser-Verfahren rechnerisch ermittelten, jährlichen Tauwassermenge von der rechnerischen Verdunstungsmenge je Jahr mindestens die vorgenannten Werte für Dächer und Wände ergeben.

Beim Nachweis mit numerischen Simulationsverfahren nach DIN EN 15026 (hygrothermische Berechnung) ist der konvektive Feuchteintrag entsprechend der geplanten Luftdurchlässigkeit mit dem q_{50} -Wert nach DIN 4108-7 ($\max. 3,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$) in Rechnung zu stellen.

Die vorgenannten Nachweise (Tauwassernachweis, Nachweis der Trocknungsreserve) sind für die Konstruktionen nach Anhang A der DIN 68800-2 nicht erforderlich bzw. gelten durch entsprechende Untersuchungen und Erfahrungen als bereits erbracht. Eine Ausnahme bilden Balkone/Terrassen nach Bild A.23. Für diese Konstruktion muss aufgrund der besonderen Bedingungen hinsichtlich der Planung und Ausführung als einziges im Anhang A aufgeführtes Bauteil ein Nachweis des Tauwasserschutzes nach DIN 4108-3 geführt werden.

Grundlage für die Nachweisfreiheit dieser Konstruktionen ist die Einhaltung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken (s_d -Wert) der inneren und äußeren Bauteilschichten nach Tab. 4.10.

Tab. 4.10 Anforderungen an wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicken (Tabelle 1, DIN 68800-2).

s_d -Wert außen ($s_{d,e}$)	s_d -Wert innen ($s_{d,i}$)
$\leq 0,1$ m	$\geq 1,0$ m
$\leq 0,3$ m	$\geq 2,0$ m
$0,3$ m ^{a)} $\leq s_{d,e} \leq 4,0$ m ^{a)}	$\geq 6 \cdot s_{d,e}$ ^{a)}

Zusätzliche Dämmschichten auf der Raumseite dürfen maximal 20 % des Gesamtwärmedurchlasswiderstands aufweisen.

- a) Nur bei werksseitiger Vorfertigung nach Richtlinie für die Überwachung von Wand-, Decken- und Dachtafeln für Holzhäuser in Tafelbauart nach DIN 1052 Teil 1 bis Teil 3:1992-06 (sog. Holztafelbaurichtlinie) in Verbindung mit DIN 1052:2008-12 und DIN 1052/Berichtigung 1:2010-05.

In diesem Zusammenhang bestehen oftmals Unklarheiten über die Definition von diffusionsoffenen, diffusionshemmenden und diffusionsdichten Schichten und deren Abgrenzung voneinander. In DIN 4108-3 werden bislang folgende Grenzen zum Diffusionsverhalten von Bauteilschichten definiert:

$s_d \leq 0,5$ m	= diffusionsoffen
$s_d > 0,5$ m/ $s_d < 1500$ m	= diffusionshemmend (Dampfbremse)
$s_d \geq 1500$ m	= diffusionsdicht (Dampfsperre)

Diese Einteilung ist für die praktische Anwendung im Holzbau oftmals zu ungenau, was insbesondere für die große Bandbreite der diffusionshemmenden Schichten gilt. Im WTA-Merkblatt E-6-8 „Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation“ wurde daher eine weitergehende Unterteilung und Definition dieser Wertebereiche vorgenommen, wie in Tabelle 4.11 aufgeführt.

Die Erkenntnisse aus jahrzehntelanger Forschung und Praxis mündeten in einer einfachen Grundregel der Bauphysik: „Konstruktionen, die auf der Außenseite dampfdiffusionstechnisch offene Schichten haben, sollten bevorzugt werden.“ Dies kann ergänzt werden durch den Grundsatz: „Bauteile sollten innen so diffusionshemmend wie nötig und außen so diffusionsoffen wie möglich aufgebaut sein.“

Tab. 4.11 Definition von Begriffen zur Wasserdampfdurchlässigkeit und der Zuordnung eines Bereichs der s_d -Werte nach WTA [4.10].

Begriff	s_d -Wert [m] ^{a)}
diffusionsoffen	$s_d \leq 0,5$
moderat dampfbremsend	$2 < s_d \leq 5$
stark dampfbremsend	$10 < s_d \leq 100$
dampfsperrend	$100 < s_d \leq 400$
dampfdicht	$s_d \geq 1500$

- a) Den nicht definierten Zwischenbereichen ist entweder keine eindeutige hygrothermische Funktion oder kein relevanter Einfluss auf das Bauteilverhalten zuzuordnen.

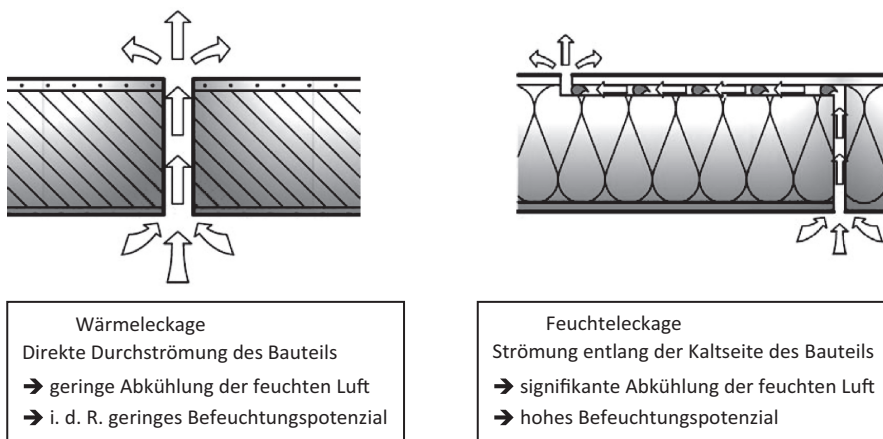


Abb. 4.10 Prinzipien der Leckagearten und deren Befeuchtungspotenzial (Quelle: H.M. Künzel).

Bezüglich der Dampfkonvektion, also des strömunggeführten Eintrags von Raumluftfeuchte durch Leckagen in einem Holzbauteil, sind grundsätzlich zwei wirkungsdifferente Arten zu unterscheiden. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Strömungswegs durch das Bauteil und des daraus folgenden Befeuchtungspotenzials. Befeuchtungswirksame Leckagen bestehen stets aus einer Leckage in der raumseitigen Luftdichtheitsebene (Warmseite) und einer weiteren Leckage in der äußeren Abschlussebene (Kaltseite). Nur durch die Verbindung der beiden Leckagen kann es zu einer wirksamen Durchströmung des Bauteils durch die thermisch bedingten Luftdruckdifferenzen zwischen Raum- und Außenluft kommen. Das Befeuchtungspotenzial von derartigen Leckagen ist im Wesentlichen durch den Weg bestimmt, den die feuchteangereicherte Luft durch das Bauteil nimmt.

Die sogenannte „Wärmelecke“ besteht aus annähernd gegenüberliegenden Leckagen auf der Raum- und Außenseite des Bauteils. Der Luftstrom durchläuft das Bauteil somit auf nahezu direktem Weg, sodass die warme Luft ohne signifikante Abkühlung das Bauteil wieder verlässt. Damit findet nur eine marginale Kondensatbildung innerhalb des Bauteils statt.

Demgegenüber steht die sogenannte „Feuchtelecke“, bei der die innere und äußere Leckage gegeneinander versetzt angeordnet sind. Dabei streicht die feuchteangereicherte Luft eine gewisse Strecke an der Kaltseite des Bauteils entlang, bis es zum Austritt an der Leckage in der äußeren Abschlussebene kommt. Dies ermöglicht eine deutliche Abkühlung der Luft an der Kaltseite des Bauteils, sodass es zu einem signifikanten Kondensatausfall kommen kann.

In Abb. 4.10 sind die Prinzipien der „Wärmelecke“ und der „Feuchtelecke“ und deren Wirkungsunterschied schematisch dargestellt.

Nachfolgend werden die wesentlichen bauphysikalischen Grundregeln für geschlossene Bauteile und Konstruktionen in Holzbauweise aufgezeigt und kritisch betrachtet. Die hier enthaltenen Empfehlungen für den praktischen Umgang mit den Regelungen der Norm sollen eine ausreichende Feuchterobustheit der Bauteile und Konstruktionen sicherstellen.

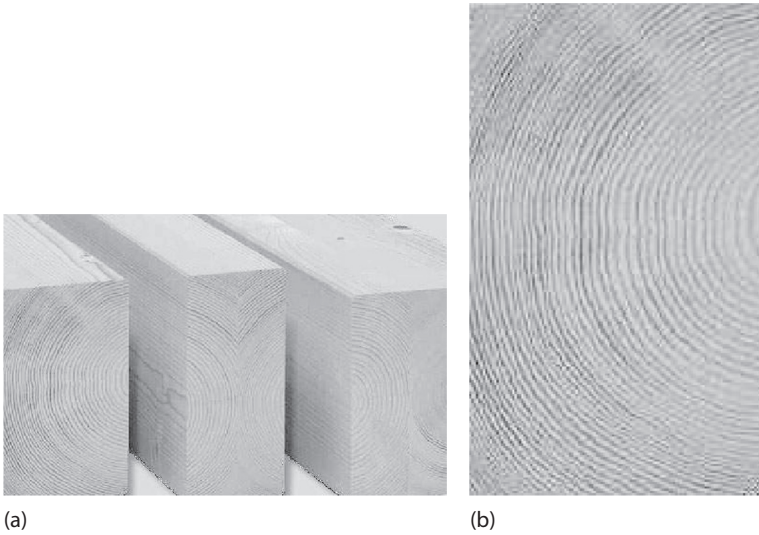


Abb. 5.8 Darstellung des Jahrringverlaufs; (a) Brettschichtholz mit einem hohen Anteil liegender Jahrringe, (b) Vollholz mit einem hohen Anteil geneigter Jahrringe.

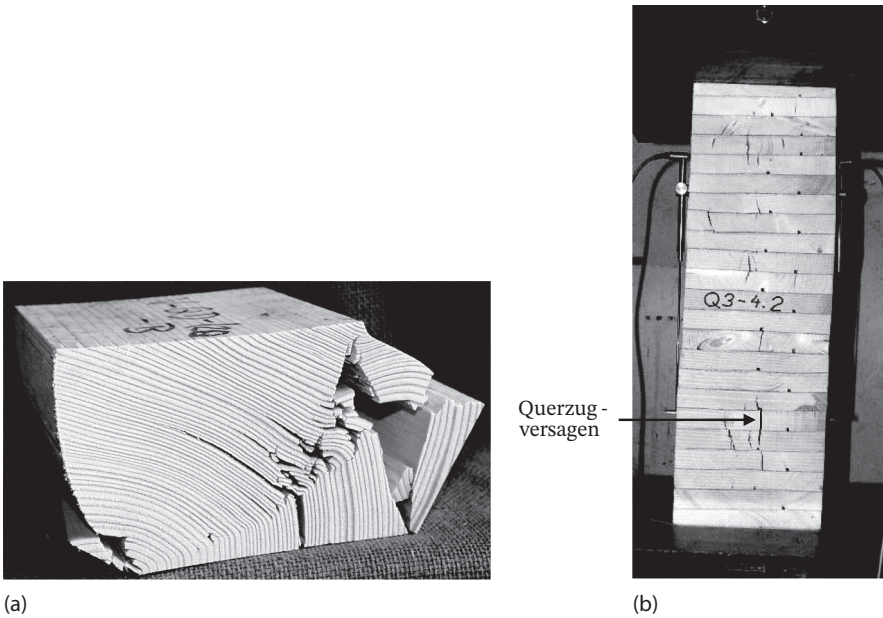


Abb. 5.9 Querdruckversagen (a) beim Vollholzquerschnitt mit überwiegend geneigten Jahrringen und (b) beim Brettschichtholz mit überwiegend liegenden Jahrringen (Quelle: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen).

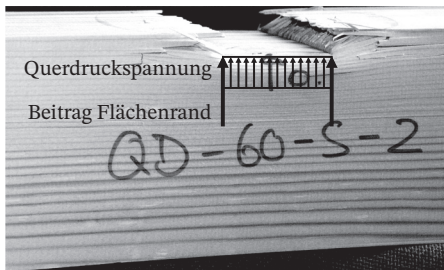


Abb. 5.10 Beitrag des Flächenrands zur Querdruckbeanspruchbarkeit am Vollholzbalken (Quelle: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen).

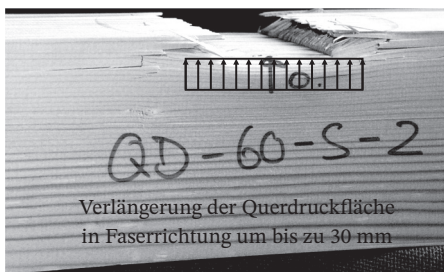
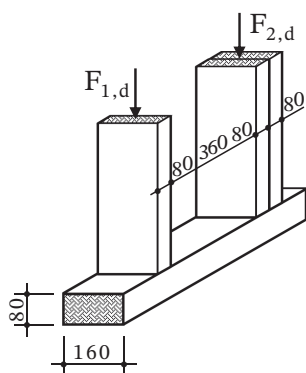


Abb. 5.11 Vergrößerung der Querdruckfläche zur Berücksichtigung des Beitrags des Flächenrands (Quelle: Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen).

Das Beispiel zeigt, dass die mögliche Erhöhung der Querdruckflächen mit zunehmender Abstandslänge abnimmt und somit bei großen Teilflächenbelastungen von untergeordneter Bedeutung bleibt. Das nachfolgende Beispiel zeigt, dass sich bei einer Verdopplung der Fläche aufgrund des Einflusses der seitlichen Lastausbreitung lediglich eine Steigerung der Beanspruchbarkeit auf das 1,57-Fache ergibt.



NKL: 1
KLED: kurz } $k_{mod} = 0,9$

Stützen: C24
Schwelle: C24

$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$

Bemessungswert der Querdruckfestigkeit:

$$f_{c,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 0,9 \cdot \frac{2,5}{1,3} = 1,73 \text{ N/mm}^2 \quad (5.15)$$

Maximal aufnehmbare Schwellenbeanspruchungen:

$$F_{1,d} \leq 1,25 \cdot 1,73 \cdot 160 \cdot (80 + 2 \cdot 30) \cdot 10^{-3} = 48,4 \text{ kN} \quad (5.16)$$

$$F_{2,d} \leq 1,25 \cdot 1,73 \cdot 160 \cdot (2 \cdot 80 + 2 \cdot 30) \cdot 10^{-3} = 76,1 \text{ kN} = 1,57F_{1,d} \quad (5.17)$$

Die Tragfähigkeit von Holz bei Druckbeanspruchungen rechtwinklig zur Faserrichtung wird zusätzlich durch den Abstand der Teilflächenbelastungen zueinander

Tab. 5.5 Druckbeiwerte $k_{c,90}$.

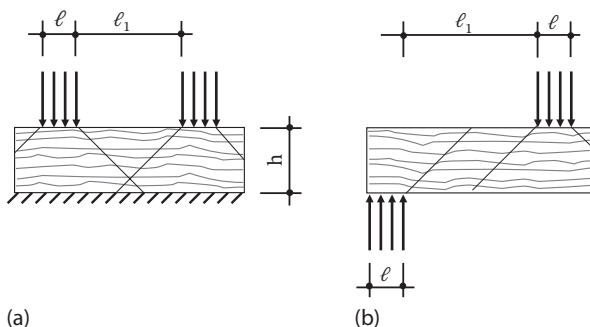
Baustoff	$l_1 < 2h$	$l \geq 2h$	
		Schwellendruck	Auflagerdruck $l < 400 \text{ mm}$
BSH aus NH	1,0	1,5	1,75
VH aus NH	1,0	1,25	1,5
VH aus LH		1,0	

Anmerkung:

- (1) Bei Brettschichtholz aus Nadelholz mit verteilten Lasten und/oder Einzellasten, die weiter als $l_1 = 2h$ von der Abstützung entfernt sind, darf für Kontaktlängen größer als 400 mm gemäß DIN EN 1995-1-1/A2 ebenfalls ein Beiwert $k_{c,90}$ von 1,75 verwendet werden.
- (2) Eine Reihe von Einzellasten, die nahe beieinander wirken (z. B. Rippen oder Querhölzer mit einem Abstand $< 610 \text{ mm}$), darf gemäß DIN EN 1995-1-1/A2 als verteilte Last betrachtet werden.

beeinflusst. Je größer der Abstand der Aufstandsflächen zueinander ist, desto weniger beeinflussen sich Querdruckbeanspruchungen infolge der Lastausbreitung. Dieser Effekt darf bei der Bemessung durch eine Erhöhung der Querdruckfestigkeit $f_{c,90,d}$ mit dem Querdruckbeiwert $k_{c,90}$ zwischen 1,0 und 1,75 berücksichtigt werden (Tab. 5.5). Hierbei wird zwischen Schwellendruck und Auflagerdruck unterschieden. Der Auflagerdruck zeigt im Vergleich zum Schwellendruck eine nochmals günstigere Auswirkung aufgrund der Lastanordnung und der damit verbundenen Lastausbreitung (Abb. 5.12). Daher sind bei gleichen Abständen l_1 der Teilflächenbelastungen die Querdruckbeiwerte für den Auflagerdruck stets größer.

Beim Druck unter einem Winkel α handelt es sich um eine Spannungsinteraktion, die sich aus Druckanteilen parallel und senkrecht zur Faserrichtung des Holzes sowie aus Schubspannungen zusammensetzt (siehe Gln. (5.18)–(5.20)). Daher gehen in die Bedingungsgleichung zur Ermittlung der Druckfestigkeit unter einem Winkel α sowohl die Druckfestigkeit parallel als auch senkrecht zur Faserrichtung des Holzes und die Schubspannung ein. Ebenso wie für den Nachweis einer Druckbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes darf bei einer Beanspruchung unter einem Winkel α der Nachweis unter Verwendung einer wirksamen

**Abb. 5.12** Zusammenhang der Lastausbreitung bei (a) Schwellen- und (b) Auflagerdruck.

Querdruckfläche geführt werden.

$$\text{Parallel} \quad \sigma_{c,0,d} = \sigma_{c,\alpha,d} \cdot \cos^2 \alpha \quad (5.18)$$

$$\text{Senkrecht} \quad \sigma_{c,90,d} = \sigma_{c,\alpha,d} \cdot \sin^2 \alpha \quad (5.19)$$

$$\text{Schubspannungen} \quad \tau_d = \sigma_{c,\alpha,d} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (5.20)$$

Es wäre somit folgende Interaktionsgleichung zu berücksichtigen:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{c,90,d}}{f_{c,90,d}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_d}{1,5 \cdot f_{v,d}} \right)^2 \leq 1 \quad (5.21)$$

In die Interaktionsgleichung eingesetzt ergibt sich folgende Bemessungsgleichung für eine Druckspannung unter einem Winkel α zur Faserrichtung des Holzes:

$$\frac{\frac{\sigma_{c,\alpha,d}}{f_{c,0,d}}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \leq 1 \quad (5.22)$$

mit

- $k_{c,90}$ Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Einwirkung, der Spaltgefahr und des Grades der Druckverformung
- $\sigma_{c,\alpha,d}$ Druckspannung unter einem Winkel α zur Faserrichtung
- $f_{c,0,d}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung
- $f_{c,90,d}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung

Mit Zunahme des Winkels zwischen Kraft- und Faserrichtung nimmt die Druckfestigkeit deutlich ab. Sie beträgt für einen Winkel von 45° nur 20 % der Tragfähigkeit in Faserrichtung und für einen Winkel von 90° nur 12 %. Dieser Zusammenhang ist für Vollholz der Festigkeitsklasse C24 bei einer Verwendung in den Nutzungsklassen 1 und 2 bei einer maßgebenden Klasse der Lasteinwirkungsdauer mittel in Abb. 5.13 dargestellt.

$$\begin{aligned} f_{c,0,d} &= 12,92 \text{ N/mm}^2 & 100 \% \\ f_{c,45,d} &= 2,60 \text{ N/mm}^2 & 20 \% \\ f_{c,90,d} &= 1,54 \text{ N/mm}^2 & 12 \% \end{aligned}$$

Biegung Für eine einachsige Biegung um die starke oder schwache Achse des Trägers wird der Biegespannungsnachweis als Normalspannungsnachweis wie folgt geführt:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (5.23)$$

Neben der Nutzungsklasse und der Klasse der Lasteinwirkungsdauer, die über den Beiwert k_{mod} berücksichtigt werden, spielt bei der Festlegung der bemessungsrelevanten Biegefestigkeiten ein sogenannter „Volumen- oder Höheneffekt“ eine Rolle.

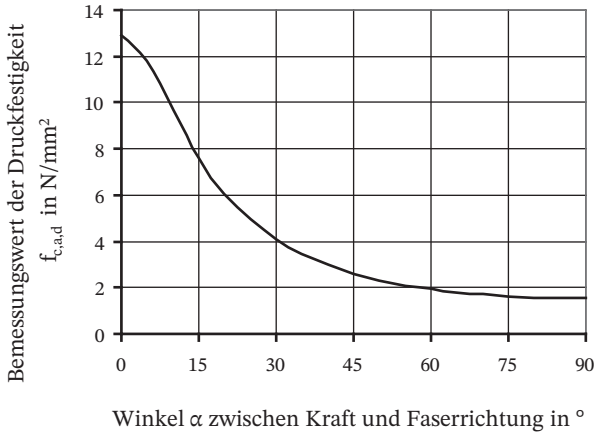


Abb. 5.13 Bemessungswert der Druckfestigkeit von Vollholz der Festigkeitsklasse C24 in Abhängigkeit der Kraft- zur Faserrichtung (NKL 1 und 2, KLED mittel).

Er berücksichtigt, dass die Biegefestigkeit mit zunehmender Bauteilhöhe abnimmt. Ursächlich hierfür sind Schwachstellen in der Zugzone, die die Tragfähigkeit maßgeblich beeinflussen. Bei Biegeträgern mit großem Volumen oder großer Höhe ist die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins derartiger Fehlstellen in den Lamellen der Zugzone höher als bei kleinen Querschnitten. Diese größere Anzahl kann somit kleinere Festigkeiten bedingen. Die charakteristischen Biegefestigkeiten $f_{m,k}$ für Brettschichtholz mit liegenden Lamellen gelten für eine Bezugshöhe h_0 von 600 mm. Für Querschnitte, die kleiner sind, darf der Bemessungswert der Biegefestigkeit um einen Beiwert k_h erhöht werden.

$$230 \text{ mm} < h < 600 \text{ mm} : k_h = \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}$$

$$h \leq 230 \text{ mm} : k_h = 1,1$$

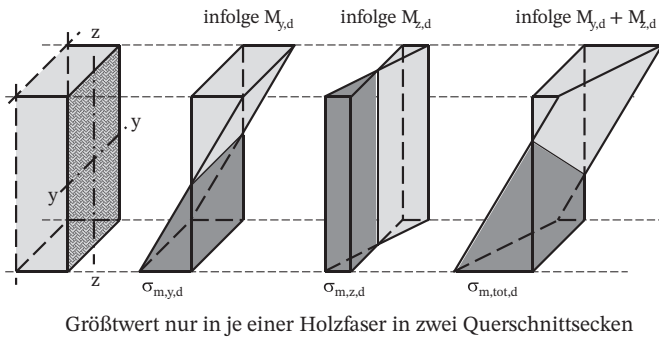
Bei Brettschichtholz mit stehenden Lamellen liegt der Biegefestigkeit bereits eine Bezugshöhe von 150 mm zugrunde. Daher darf für diese Art der Beanspruchung kein Höheneffekt berücksichtigt werden.

Bei Vollholz liegt der Festlegung der charakteristischen Biegefestigkeiten eine Bezugshöhe von 150 mm zugrunde. Daher darf hier nur für Querschnitte, deren Höhe geringer als die genannte Bezugshöhe ist, eine Erhöhung der Biegefestigkeit um k_h erfolgen:

$$40 \text{ mm} < h < 150 \text{ mm} : k_h = \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}$$

$$h \leq 40 \text{ mm} : k_h = 1,3$$

Aufgrund der unterschiedlichen Erhöhungsbeiwerte für Voll- und Brettschichtholz ergeben sich für Trägerhöhen zwischen 150 und 600 mm unterschiedlich hohe Bemessungswerte der Biegefestigkeiten bei gleichen charakteristischen Ausgangswerten. So ist beispielsweise für einen Träger mit einer Höhe von 300 mm bei Brett-



Größtwert nur in je einer Holzfaser in zwei Querschnittssecken

Abb. 5.14 Spannungsinteraktion für zweiachsige Biegebeanspruchung.

schichtholz eine Biegefestigkeit von $25,7 \text{ N/mm}^2$ zu berücksichtigen, während für einen Vollholzquerschnitt keine Erhöhung möglich ist und somit der charakteristische Wert mit 24 N/mm^2 zugrunde zu legen ist. Der Unterschied beträgt somit 7%.

Der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit zweiachsig auf Biegung beanspruchter Holzbauteile ist über eine lineare Interaktionsgleichung beider Spannungsanteile geregelt (Gl. (5.24)). Die maximale Biegedruckspannung wird bei einem Rechteckquerschnitt nur in der äußersten Faser einer Querschnittsecke erreicht, in der sich die maximalen Biegedruckanteile beider Biegeanteile addieren (Abb. 5.14). Die größte Biegezugspannung stellt sich demzufolge in der diagonal gegenüberliegenden äußeren Querschnittsfaser ein. Die Spannungen der benachbarten Fasern sind geringer. Durch dieses nur punktförmige Auftreten der maximalen Biegespannung ist insgesamt die Wahrscheinlichkeit geringer, dass an der Stelle des Maximalwerts eine Fehlstelle, wie beispielsweise ein Ast, vorhanden ist. Bei einachsiger Biegung treten die maximalen Biegespannungsanteile entlang der gesamten gegenüberliegenden Querschnittsränder auf. Daher darf im Falle zweiachsiger Biegung auf eine vollständige Interaktion der Spannungsanteile für Rechteckquerschnitte aus Voll-, Brett- und Balkenschichtholz mit einem Seitenverhältnis $h/b \leq 4$ verzichtet werden. Es darf daher jeweils ein Spannungsanteil mit einem k_m -Faktor von 0,7 abgemindert werden. Für Kreisquerschnitte sind keine Abminderungen zulässig.

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \text{oder} \quad k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.24)$$

Für Rechteckquerschnitte aus Voll-, Brettschicht- und Furnierschichtholz: $k_m = 0,7$
 Für alle anderen tragenden Holzwerkstoffe und Querschnittsformen: $k_m = 1,0$

Für eine Spannungscombination aus Biegung und Zug erfolgt eine lineare Überlagerung, während bei einer Kombination aus Biegung und Druck der Spannungsanteil aus der Druckbeanspruchung quadratisch und somit vermindert berücksichtigt werden darf. Ursächlich hierfür ist das positive plastische Verhalten von Holz unter Druckbeanspruchungen. Aufgrund dieser Eigenschaft ist das Holz in der Lage, Spannungsspitzen in weniger beanspruchte Bereiche umzulagern. Darüber hinaus stellt sich ein weiterer, die Tragfähigkeit steigernder Effekt dadurch ein, dass die maximale Biegezugspannung durch den Druckanteil vermindert wird. Der Quer-

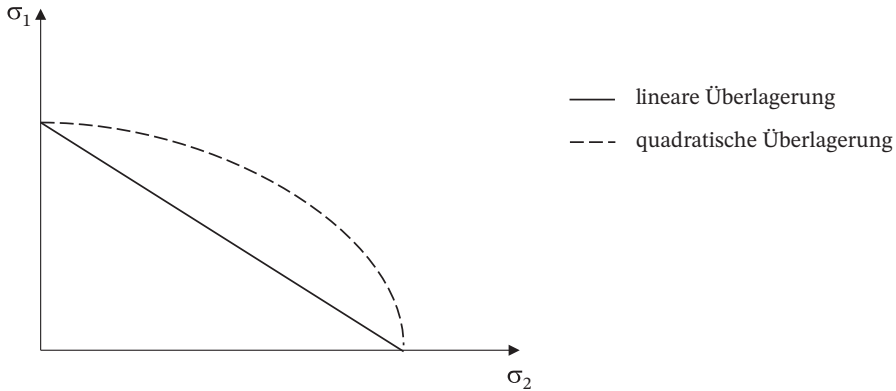


Abb. 5.15 Vergleich linearer und quadratischer Spannungsüberlagerung.

schnitt erreicht durch dieses Überdrücken erst bei größeren Biegemomenten seine Biegefestigkeit (Abb. 5.15).

Druck und Biegung:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \text{oder} \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.25)$$

Zug und Biegung:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad \text{oder} \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.26)$$

Sowohl für Biegung und Druck als auch für Biegung und Zug sind gegebenenfalls Querschnittsschwächungen zu berücksichtigen (s. Abschnitt Druck).

Schub Eine gleichmäßig verteilte Lasteinleitung auf einen Träger mit gegenüberliegendem direkten Auflager (Abb. 5.16) bewirkt gleichzeitig eine Querdruckspannung. Diese wirkt sich positiv auf das Tragverhalten bei Schubbeanspruchungen

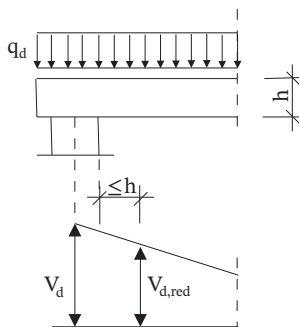


Abb. 5.16 Abminderung der Querkraft bei gleichmäßig verteilter Last.

aus. Durch Einleitung der Druckspannungstrajektorien in das direkte Auflager entsteht die maximale Schubspannung erst in einem Abstand h vom Auflagerend. Zur Berücksichtigung dieses Effekts darf für den Nachweis der Schubspannung bei Trägern mit einer unterseitigen Auflagerung und oberseitiger Belastung als maßgebende Querkraft V_d der abgeminderte Wert im Abstand der Trägerhöhe h vom Auflagerend angesetzt werden.

Für biegebeanspruchte Bauteile ist beim Schubnachweis der Einfluss von Rissbildungen zu berücksichtigen. Dies erfolgt durch den Ansatz einer effektiven Querschnittsbreite b_{ef} . Hierdurch soll der Unterschied der Tragfähigkeit der Bauteile nach längerer Standdauer zu Bauteilen bei Auslieferung, z. B. infolge Rissbildung, unter Berücksichtigung der statistischen Verteilung über die Bauteiloberfläche berücksichtigt werden. Der Faktor k_{cr} kann jedoch nicht mit einer zulässigen Risstiefe im Endzustand gleichgesetzt werden. Da Brettschichtholz aufgrund der Verklebung kleinerer Lamellen weniger zur Rissbildung neigt als Vollholz, darf für diese Bauteile mit geringeren Abminderungen gerechnet werden.

$$b_{\text{ef}} = k_{\text{cr}} \cdot b \quad (5.27)$$

$$k_{\text{cr}} = \frac{2,0}{f_{\text{v,k}}} \quad \text{für Vollholz}$$

$$k_{\text{cr}} = \frac{2,5}{f_{\text{v,k}}} \quad \text{für Brettschichtholz}$$

$$k_{\text{cr}} = 1,0 \quad \text{für Holzwerkstoffe nach EN 13986 und EN 14374, für Vollholz aus Laubholz und für Brettsperholz}$$

Zu beachten ist, dass bei Stäben aus Nadelschichtholz die Werte für k_{cr} in Bereichen, die mindestens 1,50 m vom Hirnholzende des Holzes entfernt liegen, um 30 % erhöht werden dürfen.

Beim gleichzeitigen Auftreten von zweiachsiger Biegung und gegebenenfalls Torsionsanteilen ist eine Interaktion aller Spannungsanteile durchzuführen. Der Beiwert k_{shape} berücksichtigt die Form des Querschnitts, rund oder rechteckig.

$$\frac{\tau_{\text{tor,d}}}{k_{\text{shape}} \cdot f_{\text{v,d}}} + \left(\frac{\tau_{\text{y,d}}}{f_{\text{v,d}}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\text{z,d}}}{f_{\text{v,d}}} \right)^2 \leq 1 \quad (5.28)$$

Nachweis für Stäbe nach dem Ersatzstabverfahren Die Tragfähigkeit druckbeanspruchter Bauteile nimmt mit Zunahme der bezogenen Knickschlankheit $\lambda_{\text{rel,c}}$ ab. Beim Nachweis knickgefährdeter Stäbe nach dem Ersatzstabverfahren wird diesem Tragverhalten durch eine Abminderung der Druckfestigkeit durch Multiplikation mit dem Knickbeiwert k_c Rechnung getragen.

Mit Zunahme des bezogenen Kippschlankheitsgrads $\lambda_{\text{rel,m}}$ nimmt die Biegetragfähigkeit ab. Dieser Einfluss wird durch eine Verminderung des Bemessungswerts der Biegefestigkeit durch Multiplikation mit dem Kippbeiwert k_m berücksichtigt.

Bei Biegestäben ist zusätzlich die Auflagerverdrehung zu verhindern. Dies kann durch einen Aussteifungsverband bzw. eine Gabellagerung erfolgen.

- Schubsteifigkeit in der yz -Ebene

$$\frac{1}{S_{yz}} = \frac{1}{a_y^2} \cdot \left(\frac{d_2}{2 \cdot G_{yz,2}} + \sum_3^{n-2} \frac{d_i}{G_{yz,i}} + \frac{d_{n-1}}{2 \cdot G_{yz,n-1}} \right) \quad (5.225)$$

- Dehnsteifigkeit in x -Richtung

$$D_x = \sum E_{xx,i} \cdot d \quad (5.226)$$

- Dehnsteifigkeit in y -Richtung

$$D_y = \sum E_{yy,i} \cdot d_i \quad (5.227)$$

- Schubsteifigkeit in der xy -Ebene mit Schmalseitenverklebung der Lamellen

$$D_{xy} = \sum G_{xy,i} \cdot d_i \quad (5.228)$$

- Schubsteifigkeit in der xy -Ebene ohne Schmalseitenverklebung der Lamellen

$$D_{xy} = \frac{1}{4} \cdot \sum G_{xy,i} \cdot d_i \quad (5.229)$$

Aktuelle Ergebnisse zur Schubsteifigkeit D_{xy} können in [5.147] gefunden werden.

5.5.4 Steifigkeitsüberprüfung bei Stabberechnungen

5.5.4.1 Allgemeines zur Steifigkeitsüberprüfung

Eine der wichtigsten Fragestellungen bei der Berechnung von Holztragwerken mit Computerprogrammen lautet: Kann das verwendete Computerprogramm die Steifigkeitsverhältnisse von Holz korrekt verarbeiten?

In diesem Zusammenhang spielt die Erfassung des anisotropen Materialverhaltens eine wesentliche Rolle. Da viele Computerprogramme für die Berechnung von isotropen Materialien entwickelt wurden, kann es sein, dass materialspezifische Zusammenhänge fest hinterlegt sind und nicht abgeändert werden können. Für isotrope Materialien gilt zwischen Schubmodul G und Elastizitätsmodul E unter Berücksichtigung der Querdehnzahl ν der Zusammenhang:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (5.230)$$

Wird von einem Elastizitätsmodul des Holzes $E_{\text{Holz}} \approx 10\,000 \text{ MN/m}^2$ und einer Querdehnzahl $\nu_{\text{Holz}} \approx 0$ ausgegangen, müsste der Schubmodul des Holzes nach Gl. (5.230) 5000 MN/m^2 betragen. Dies trifft aufgrund des anisotropen Verhaltens und eines real vorkommenden Schubmoduls $G_{\text{Holz}} \approx 500 \text{ MN/m}^2$ nicht zu.

Um die Verarbeitung anisotroper Eigenschaften durch Computerprogramme zu prüfen, ist es sinnvoll, einfache Beispiele zu berechnen. Die Ergebnisse sollen mit analytischen Lösungen übereinstimmen. Aus diesem Grund werden nachfolgend geschlossene Lösungen für ausgewählte Problemstellungen gezeigt.

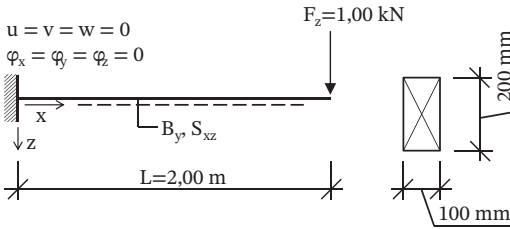


Abb. 5.149 Kragarm mit lotrechter Belastung.

5.5.4.2 Biegesteifigkeit und Schubsteifigkeit

Anhand des nachfolgenden Beispiels kann überprüft werden, ob ein Computerprogramm in der Lage ist, Biege- und Schubsteifigkeiten korrekt zu verarbeiten. Dazu wird der in Abb. 5.149 gegebene Kragarm betrachtet, welcher an der Kragarmspitze durch eine lotrechte Last F_z beansprucht wird. In den meisten Computerprogrammen reicht dazu eine Betrachtung in der zweidimensionalen Arbeitsebene (xz -Ebene). Für den Elastizitätsmodul und den Schubmodul werden folgende Werte angenommen: $E_{xx} = 10\,000 \text{ MN/m}^2$ und $G_{xz} = 500 \text{ MN/m}^2$.

Die Gesamtverformung an der Kragarmspitze unter Berücksichtigung von Biege- und Schubverformungen lässt sich wie folgt berechnen.

$$w = w_{\text{Biegung}} + w_{\text{Schub}} = \frac{F_z \cdot L^3}{3 \cdot B_y} + \frac{F_z \cdot L}{S_{xz}} \quad (5.231)$$

$$B_y = E_{xx} \cdot I_y = 10\,000 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,2^3}{12} \text{ m}^4 = 666,67 \cdot 10^{-3} \text{ MN m}^2 \quad (5.232)$$

$$S_{xz} = G_{xz} \cdot A_s = 500 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,2}{1,2} \text{ m}^2 = 8,33 \text{ MN} \quad (5.233)$$

$$w = 4,00 \cdot 10^{-3} \text{ m} + 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 4,24 \text{ mm} \quad (5.234)$$

5.5.4.3 Torsionssteifigkeit

Zur Überprüfung der St. Venant'schen Torsionssteifigkeit soll wiederum der einseitig eingespannte Kragarm betrachtet werden (Abb. 5.150). Da es sich hierbei um ein Problem im dreidimensionalen Raum handelt, muss abhängig vom verwendeten Computerprogramm eine Betrachtung im dreidimensionalen Raum stattfinden. An der Kragarmspitze wird ein Torsionsmoment $M_T = 1,00 \text{ kNm}$ aufgebracht und der Schubmodul mit $G_{xy} = 500 \text{ MN/m}^2$ festgelegt.

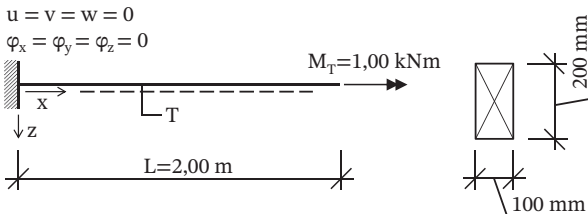


Abb. 5.150 Kragarm mit Torsionsbeanspruchung.

Die Verdrehung an der Kragarmspitze berechnet sich unter Berücksichtigung der St. Venant'schen Torsion und Wölbkrafttorsion wie folgt:

$$\phi = \frac{M_T \cdot L}{T} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda \cdot L} \cdot \tan h(\lambda \cdot L)\right) \quad (5.235)$$

$$\text{mit } \lambda = \sqrt{\frac{GI_T}{EI_\omega}}$$

Am Rechteckquerschnitt hat die Wölbkrafttorsion nahezu keinen Einfluss, weshalb Gl. (5.235) um den Klammerausdruck reduziert wird.

$$\phi = \frac{M_T \cdot L}{T} \quad (5.236)$$

$$T = G_{xy} \cdot I_T = G_{xy} \cdot \alpha \cdot h \cdot b^3 \quad (5.237)$$

$$\text{für } \frac{h}{b} = 2,0 \quad \text{gilt } \alpha = 0,229$$

$$T = 500 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot 0,229 \cdot 0,2 \cdot 0,1^3 \text{ m}^4 = 22,9 \cdot 10^{-3} \text{ MN m}^2 \quad (5.238)$$

$$\phi = \frac{1,0 \cdot 10^{-3} \text{ MNm} \cdot 2,0 \text{ m}}{22,9 \cdot 10^{-3} \text{ MN m}^2} = 87,33 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \quad (5.239)$$

5.5.4.4 Knicklasten

Eine häufig auftretende Fragestellung ist die Berechnung von Knicklasten druckbeanspruchter Bauteile. Besonders bei schubweichen Bauteilen, wie z. B. genageltem Brettsperrholz, ist es wichtig, Schubsteifigkeiten korrekt zu erfassen. Da viele Computerprogramme die Möglichkeit der Stabilitätsanalyse bieten, soll folgendes Beispiel zur Überprüfung gegeben werden (Abb. 5.151).

Wird davon ausgegangen, dass der betrachtete Stab in der xy -Ebene ausknickt, so kann die Knicklast unter Berücksichtigung von Biege- und Schubsteifigkeiten wie folgt ermittelt werden:

$$F_{x,ki} = \frac{\pi^2}{4L^2} \cdot B_z \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 B_z}{4L^2 S_{xy}}} \quad (5.240)$$

Für den Elastizitätsmodul wird $E_{xx} = 10000 \text{ MN/m}^2$ verwendet. Um einen klaren Einfluss der Schubverformungen auf das Berechnungsergebnis zu erhalten, wird

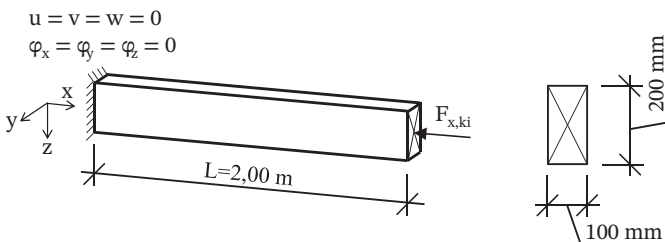


Abb. 5.151 Knicklast Druckstab.

ein sehr geringer Schubmodul von $G_{xz} = 10 \text{ MN/m}^2$ gewählt. Daraus können entsprechende Steifigkeiten ermittelt werden:

$$B_z = E_{xx} \cdot I_z = 10\,000 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,2 \cdot 0,1^3}{12} \text{ m}^4 = 166,67 \cdot 10^{-3} \text{ MN m}^2 \quad (5.241)$$

$$S_{xy} = G_{xy} \cdot A_s = 10 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,2}{1,2} \text{ m}^2 = 166,67 \cdot 10^{-3} \text{ MN} \quad (5.242)$$

Unter Berücksichtigung von Biege- und Schubsteifigkeit ergibt sich eine kritische Knicklast von:

$$F_{x,ki} = \frac{\pi^2}{4 \cdot 2,0^2} \cdot 166,67 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4 \cdot 2,0^2} \frac{166,67 \cdot 10^{-3}}{166,67 \cdot 10^{-3}}}$$

$$= 102,81 \cdot 0,618 = 63,64 \text{ kN} \quad (5.243)$$

Ohne Berücksichtigung der Schubsteifigkeit beträgt die Knicklast $F_{x,ki} = 102,81 \text{ kN}$.

5.5.4.5 Theorie II. Ordnung

Um Berechnungen nach Theorie II. Ordnung zu prüfen, soll das nachfolgende Beispiel betrachtet werden. Es wird davon ausgegangen, dass der in Abb. 5.152 dargestellte Träger in der xy -Ebene gehalten wird. Als Vergleichswert soll das Biegemoment in Feldmitte herangezogen werden.

Für den Elastizitätsmodul wird der Wert $E_{xx} = 10\,000 \text{ MN/m}^2$ angesetzt. Um einen klaren Einfluss der Schubverformungen auf das Berechnungsergebnis zu erhalten, wird ein sehr geringer Schubmodul von $G_{xz} = 10 \text{ MN/m}^2$ gewählt.

$$B_y = E_{xx} \cdot I_y = 10\,000 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,2^3}{12} \text{ m}^4 = 666,67 \cdot 10^{-3} \text{ MN m}^2 \quad (5.244)$$

$$S_{xz} = G_{xz} \cdot A_s = 10 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,1 \cdot 0,2}{1,2} \text{ m}^2 = 166,67 \cdot 10^{-3} \text{ MN} \quad (5.245)$$

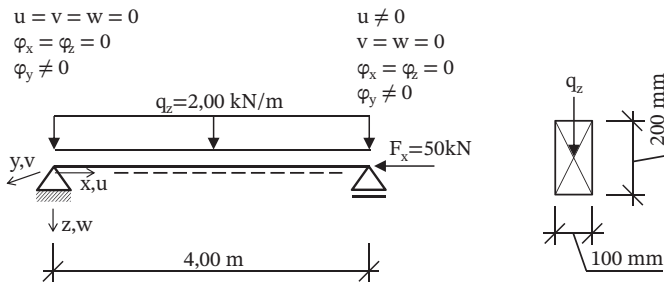


Abb. 5.152 Theorie II. Ordnung.

Die kritische Knicklast des betrachteten Trägers beträgt:

$$\begin{aligned}
 F_{x,ki} &= \frac{\pi^2 \cdot B_y}{L^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot B_y}{L^2 \cdot S_{xz}}} \\
 &= \frac{\pi^2 \cdot 666,67 \cdot 10^{-3}}{4,0^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 666,67 \cdot 10^{-3}}{4,0^2 \cdot 166,67 \cdot 10^{-3}}} \\
 &= 411,23 \cdot 10^{-3} \cdot 288,40 \cdot 10^{-3} = 118,60 \cdot 10^{-3} \text{ MN}
 \end{aligned} \tag{5.246}$$

Damit wird das Moment nach Theorie II. Ordnung in Feldmitte näherungsweise ermittelt.

$$\begin{aligned}
 M^{\text{II}} &\cong M^{\text{I}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{F_x}{F_{x,ki}}} \\
 &\cong \frac{2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 4,0^2 \text{ m}^2}{8} \cdot \frac{1}{1 - \frac{50,00 \text{ kN}}{118,60 \text{ kN}}} \\
 &= 4,0 \cdot 1,73 = 6,92 \text{ kNm}
 \end{aligned} \tag{5.247}$$

Unter Berücksichtigung eines Schubmoduls von $G_{xz} = 500 \text{ MN/m}^2$ betragen die kritische Knicklast $F_{x,ki} = 391,88 \text{ kN}$ und das Biegemoment nach Theorie II. Ordnung $M^{\text{II}} = 4,58 \text{ kNm}$. Werden keine Schubsteifigkeiten in der Berechnung berücksichtigt, so betragen die kritische Knicklast $F_{x,ki} = 411,23 \text{ kN}$ und das Biegemoment nach Theorie II. Ordnung $M^{\text{II}} = 4,55 \text{ kNm}$.

Die für die Berechnung von Holzbauten nach Theorie II. Ordnung anzusetzenden Vorverformungen, Einwirkungen und Steifigkeiten können den gültigen Bemessungsvorschriften bzw. Normen entnommen werden.

5.5.5 Steifigkeitsüberprüfung bei Flächenberechnungen

5.5.5.1 Allgemeines zur Steifigkeitsüberprüfung

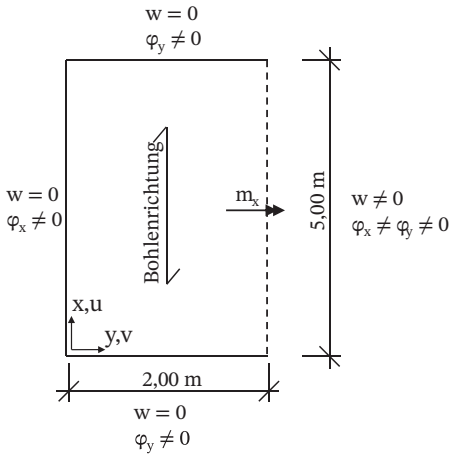
Viele Bauvorhaben werden mit flächenförmigen Holzwerkstoffen realisiert. Dazu zählen beispielsweise Brettspertholz-, Furnierschichtholz- und Brettstapelplatten. Die Schnittgrößen können mit Computerprogrammen für Platten oder Trägerroste ermittelt werden. Auch für Stabilitätsuntersuchungen hoher Brettschichtholzträger eignen sich entsprechende Plattenprogramme.

5.5.5.2 Geklebte Brettstapelplatte

Betrachtet wird eine geklebte Brettstapelplatte der Dicke $d = 120 \text{ mm}$, welche aus Holzbohlen der Festigkeitsklasse C24 zusammengesetzt ist. Die Mittelwerte der Materialkennwerte (Elastizitätsmodul, Schubmodul) in der xy -Ebene können auf Grundlage von DIN EN 338:2016-07 in Tab. 5.39 angegeben werden.

Tab. 5.39 Materialkennwerte für Vollholz C24 nach DIN EN 338:2016-07 in MN/m².

$E_{xx} = 11\,000$	0	0	0	0
0	$E_{yy} = 370$	0	0	0
0	0	$G_{xy} = 690$	0	0
0	0	0	$G_{yz} = 69$	0
0	0	0	0	$G_{xz} = 690$


Abb. 5.153 Dimensionen und Lagerungsbedingungen Brettstapelplatte.

Das entsprechende statische System einer dreiseitig, gelenkig gelagerten Platte ist in Abb. 5.153 gegeben. Als Belastung wird eine konstante Flächenlast $q = 2,00 \text{ kN/m}^2$ in z -Richtung angenommen.

Die der Berechnung zugrunde liegenden Steifigkeiten können wie folgt angegeben werden:

- Biegesteifigkeit um die y -Achse

$$B_x = \frac{E_{xx} \cdot d^3}{12} = \frac{11\,000 \cdot 0,12^3}{12} = 1,584,00 \cdot 10^{-3} \frac{\text{MN m}^2}{\text{m}} \quad (5.248)$$

- Biegesteifigkeit um die x -Achse

$$B_y = \frac{E_{yy} \cdot d^3}{12} = \frac{370 \cdot 0,12^3}{12} = 53,28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{MN m}^2}{\text{m}} \quad (5.249)$$

- Drillsteifigkeit in der xy -Ebene

$$B_{xy} = \frac{G_{xy} \cdot d^3}{6} = \frac{690 \cdot 0,12^3}{6} = 198,72 \cdot 10^{-3} \frac{\text{MN m}^2}{\text{m}} \quad (5.250)$$

Abhängig vom verwendeten Computerprogramm kann der in Gl. (5.251) ermittelte Wert für die Drillsteifigkeit erforderlich sein.

$$B_{xy} = \frac{G_{xy} \cdot d^3}{12} = \frac{690 \cdot 0,12^3}{12} = 99,36 \cdot 10^{-3} \frac{\text{MN m}^2}{\text{m}} \quad (5.251)$$