

Berechnung und Bemessung von Brettspertholz – ein Überblick

aus [Mestek/Winter 2010]

Peter Mestek
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München
DE-München



Berechnung und Bemessung von Brettsperrholz – ein Überblick

aus [Mestek/Winter 2010]

1. Einleitung

Brettsperrholzelemente zählen zu den Massivholzbauweisen. Neben der herstellernerutralen Bezeichnung Brettsperrholz (Abk.: BSP, engl.: ‚Cross Laminated Timber - CLT‘ oder ‚X-Lam‘) sind auch die Begriffe Dickholz oder Kreuzlagenholz geläufig. Erste Erfahrungen mit großflächigen Elementen aus über Kreuz verklebten Brett lamellen wurden seit Ende der neunziger Jahre gesammelt. Nach der erfolgreichen Durchführung von Pilotprojekten wurde die geregelte Anwendung von Brettsperrholz für tragende Konstruktionen mit der ersten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des Instituts für Bautechnik (DIBt) im Dezember 1998 möglich. Weitere Zulassungen österreichischer, schweizerischer und deutscher Hersteller folgten in den nächsten Jahren. Die kontinuierlich wachsende Anzahl von Produktionsstätten und bauaufsichtlichen Zulassungen belegen deutlich die zunehmende Akzeptanz und Attraktivität dieser ökologischen Bauweise, die sich inzwischen im Holzbau etabliert hat.

1.1. Anwendungsbereiche

Brettsperrholzelemente werden überwiegend für tragende und aussteifende Dach-, Decken- und Wandbauteile beim Bau von Ein- und Zweifamilienhäusern, im mehrgeschossigen Wohnungsbau, bei Schul-, Gewerbe- und Sakralbauten und vergleichbaren Bauvorhaben und teilweise auch im Industriebau eingesetzt. In der Regel liegt die Nutzungsklasse 1 bzw. 2 und überwiegend ruhende Belastung vor. Es wurden aber auch schon Erfahrungen im Bereich des Brückenbaus und somit für veränderliche Belastungen gesammelt. Generell eignen sich Brettsperrholzbauteile für den Einsatz in nachfolgenden Tragfunktionen (siehe Abbildung 1):

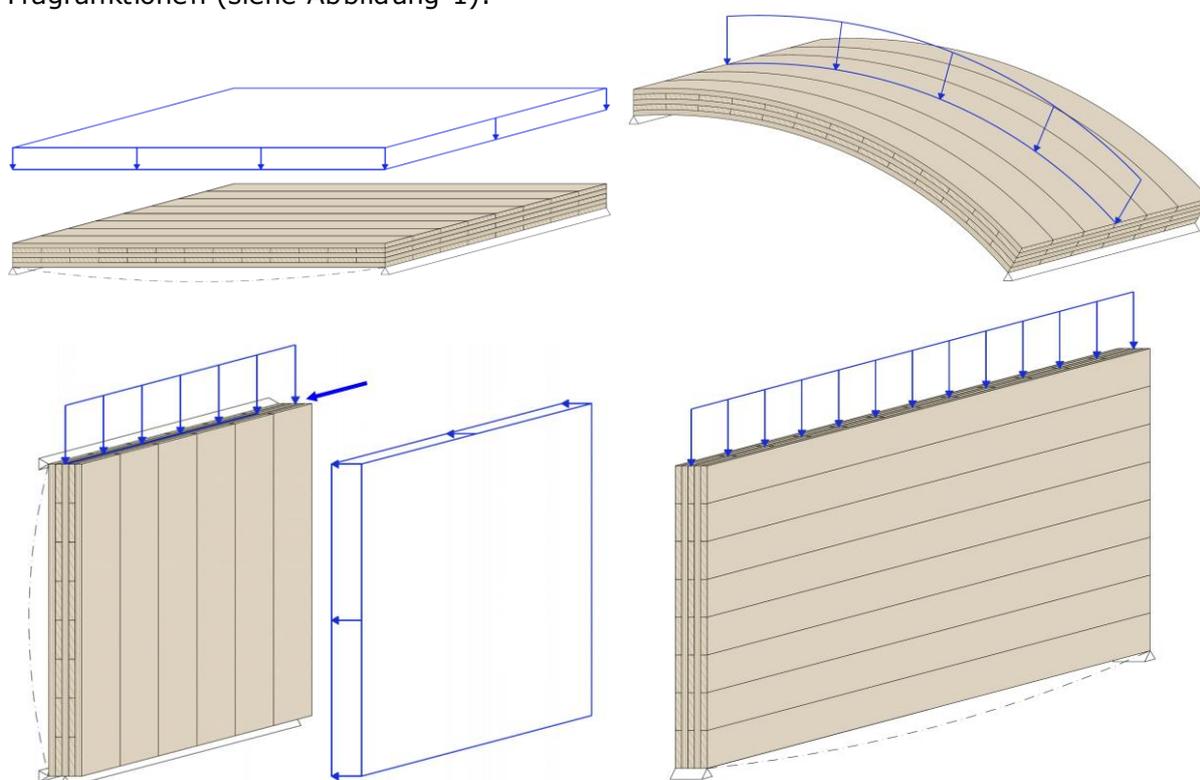


Abbildung 1: Anwendungsmöglichkeiten

1.2. Technische Grundlagen

Die baurechtlichen Grundlagen für die Verwendbarkeit der verschiedenen Brettspertholzprodukte sind derzeit noch nationale ‚allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen‘ (z. B. abZ des Deutschen Institutes für Bautechnik) bzw. auf der europäischen Ebene europäisch technische Zulassungen (ETA). Die Vergabe der europäischen technischen Zulassungen erfolgt über die Mitgliedsvereinigungen der European Organization For Technical Approvals (EOTA). Die im Rahmen des Zulassungsverfahrens durchzuführenden Untersuchungen bzw. Prüfungen werden für Brettspertholzelemente in der [CUAP 03.04/06] festgelegt, da bisher keine eigene spezifische Richtlinie (ETAG) zur Erstellung der europäisch technischen Zulassung vorliegt. Sowohl die nationalen als auch die europäisch technischen Zulassungen regeln im Wesentlichen folgende Themenbereiche:

- Zulassungsgegenstand und Anwendungsbereich
- Eigenschaften, Zusammensetzung, Material
- Herstellung und Kennzeichnung, Übereinstimmungsnachweis
- Bestimmungen für Entwurf und Bemessung (u. a. statische, bauphysikalische und brandschutztechnische Anforderungen)

Die in den Teilbereichen der Zulassungen festgelegten Bestimmungen gelten dabei jeweils in Verbindung mit nationalen bzw. europäischen Normen. So verweisen beispielsweise die europäischen Zulassungen hinsichtlich der Festigkeitsklassen der verwendeten Brettlamellen auf die europäische Norm [DIN EN 338], während in den abZ des DIBt diesbezüglich auf die [DIN 4074-1] Bezug genommen wird. Die statischen Bemessungen der Brettspertholzelemente erfolgt in der Regel auf der Grundlage der [DIN 1052] bzw. des Eurocodes [DIN V ENV 1995-1-1] in Verbindung mit den nationalen Anwendungsdokumenten. Um den planenden Architekten und Ingenieuren die Anwendung von Brettspertholz weiter zu erleichtern, befindet sich eine europäische Produktnorm für geklebtes Brettspertholz in Bearbeitung.

Zudem bieten die einzelnen Hersteller in ihren Produktunterlagen verschiedene Vorbemessungsdiagramme und Querschnittswerte für die tatsächliche Bemessung an. Allerdings wird derzeit kein produktübergreifender Ansatz verfolgt, so dass einerseits effektive Querschnittswerte unter Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung der Schubverformung enthalten sind, andererseits aber auch die Querschnittswerte von Vollquerschnitten in Verbindung mit reduzierten Festigkeits- und Steifigkeitswerten angegeben sind. Eine produktübergreifende Vereinheitlichung wäre für den Tragwerksplaner daher wünschenswert und ein entscheidender Schritt, um die kontinuierlich steigende Akzeptanz bei den planenden Architekten und Ingenieuren weiter zu fördern.

Nachfolgende Ausführungen geben einen Überblick über die allgemeine Vorgehensweise bei der Berechnung und Bemessung von geklebten Brettspertholzelementen in unterschiedlichen Tragsituationen. Die Verfahren und Gleichungen sind nicht an spezielle Querschnittsaufbauten verschiedener Hersteller gebunden, sondern produktneutral anwendbar.

2. Steifigkeitsermittlung

Generell sind die Berechnungsgrundlagen von BSP-Elementen in Anhang D der [DIN 1052] in Verbindung mit den jeweiligen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt. Das Tragverhalten der Flächenelemente ist durch stoffliche und, bedingt durch die orthogonale Anordnung der einzelnen Lagen, durch konstruktive Anisotropie geprägt. Folglich ist es für die Spannungs- und Verformungsberechnung von entscheidender Bedeutung die korrekten Querschnitts- und Steifigkeitswerte anzusetzen. Da es sich bei Brettspertholz um Flächenelemente handelt, werden diese Werte im weiteren Verlauf für einen Plattenstreifen mit einer Breite von einem Meter angegeben.

2.1. Querschnittskenngrößen

Lasten senkrecht zur Elementebene erzeugen Biegebeanspruchungen, die bei Deckensystemen in erster Linie über die parallel zur Spannrichtung verlaufenden Brettlagen abgetragen werden. Der Brettspertholzbalken kann dabei als einachsig gespannter Plattenstreifen betrachtet werden. Bei symmetrischen Querschnitten mit gleicher Materialgüte in den einzelnen Lagen stimmt die Schwerachse mit der Symmetrieachse des Querschnitts überein. Die geometrischen Zusammenhänge sind in Abbildung 2 dargestellt. Aufgrund der großen Unterschiede in den Elastizitätsmoduln der einzelnen Lagen können bei der Ermittlung der Querschnittswerte die Querlagen vernachlässigt werden. Für das effektive Trägheitsmoment $I_{ef,x}$ gilt:

$$I_{ef,x} = \sum d_{x,i}^3 / 12 + \sum d_{x,i} \cdot z_{s,i}^2 \quad (\text{Gl. 1})$$

Analog werden auch Normalkräfte nur über die zur Krafrichtung parallel verlaufenden Längslagen abgetragen. Folglich beträgt der effektive Nettoquerschnitt in x-Richtung:

$$A_{ef,x} = \sum d_{x,i} \quad (\text{Gl. 2})$$

Für die Schubspannungsberechnung muss zusätzlich das statische Moment ermittelt werden:

$$S_{ef,x} = \sum_{i=1}^{(n-1)/2} d_{x,i} \cdot z_{s,i} \quad (\text{Gl. 3})$$

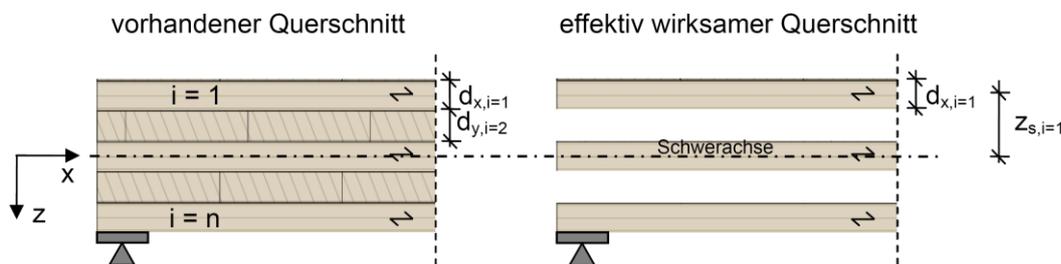


Abbildung 2: Ermittlung der effektiven Querschnittskenngrößen

2.2. Ersatzschubsteifigkeit

Die Schubverformung stellt aufgrund der kreuzweisen Anordnung der Brettlagen und den damit verbundenen unterschiedlichen Schubmoduln in den einzelnen Schichten einen komplexen Zusammenhang dar. Im Anhang D der [DIN 1052] wird die Schubverformung durch eine Ersatzschubsteifigkeit berücksichtigt. Diese wird an einem Ersatzquerschnitt ermittelt, der die gleiche Schubverformung aufweist wie der tatsächliche Verbundquerschnitt (Abbildung 3). Der Schubfluss t wird dabei über die Elementhöhe als konstant angenommen.

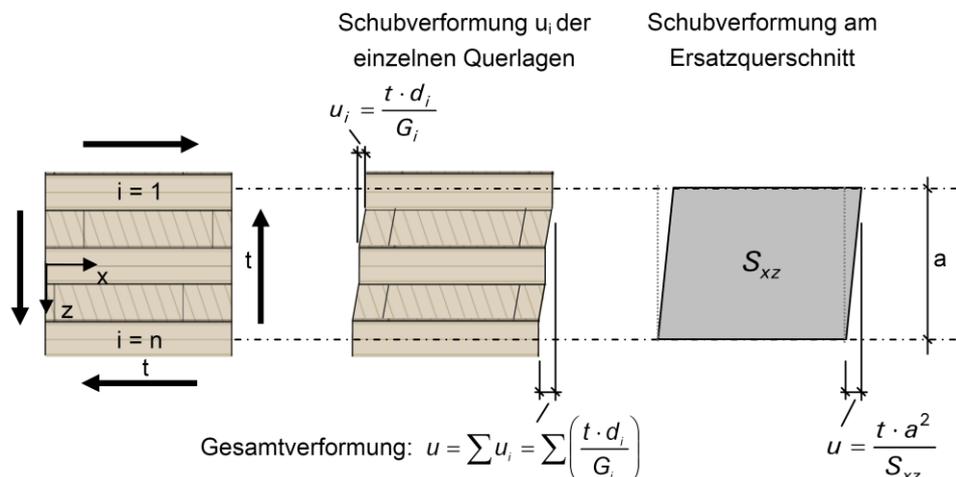


Abbildung 3: Ermittlung der Ersatzschubsteifigkeit S_{xz}

Durch Gleichsetzen der Gesamtverformung u ergibt sich folgender Term zur Ermittlung der Ersatzschubsteifigkeit S_{xz} .

$$\frac{1}{S_{xz}} = \frac{1}{a^2} \left\{ \frac{d_1}{2 \cdot G_{xz,1}} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{d_i}{G_{xz,i}} + \frac{d_n}{2 \cdot G_{xz,n}} \right\} \quad (\text{Gl. 4})$$

Für Elemente mit ungerader Schichtanzahl n und symmetrischem Querschnitt, deren Einzelschichten aus Brettware gleicher Dicke und Materialgüte bestehen, kann die Berechnung weiter vereinfacht werden. In den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen ist in der Regel ein Rollschubmodul G_R der Querlagen mit 50 N/mm^2 angegeben. Da der Rollschubmodul der Querlagen somit weniger als 10% des Schubmoduls der Längslagen beträgt, resultiert das Verformungsbild unter Schubbeanspruchung im Wesentlichen aus der Verformung der Querlagen. Näherungsweise können die Verformungsanteile der Längslagen vernachlässigt werden und die Ersatzschubsteifigkeit des Querschnitts berechnet sich wie folgt:

$$S_{xz} = 2 \cdot (n-1) \cdot d_{y,i} \cdot G_R \quad (\text{Gl. 5})$$

3. Deckenelemente – Plattenbeanspruchung

Die Berücksichtigung der Schubverformung bzw. des nachgiebigen Verbundes erfolgt nach dem Verfahren der Schubanalogie und ist in Abschnitt D3 der [DIN 1052] enthalten. Der geringe Rollschubmodul der Querlagen führt dazu, dass bei gedrungenen Elementabmessungen oder Beanspruchungen durch Einzellasten die relativ großen Schubverformungen der Querlagen quasi zu einem nachgiebigen Verbund der zur Haupttragrichtung parallel verlaufenden Lagen führen. Durch die Berücksichtigung des nachgiebigen Verbundes nimmt die Schwerpunktsspannung $\sigma_{c/t,0,d}$ in den einzelnen Lagen ab, während der Anteil der Biegespannungen $\sigma_{m,d}$ zunimmt (Abbildung 4). Somit ergeben sich größere, für die Bemessung maßgebende Randspannungen $\sigma_{R,d}$. Bei dem betrachteten Element sind die Einzelbretter der Querlagen nicht an den Schmalseiten miteinander verklebt. In diesem Fall ist der E-Modul der Querlagen gleich null zu setzen. Daher ergeben sich in den Querlagen keine Längsspannungen.

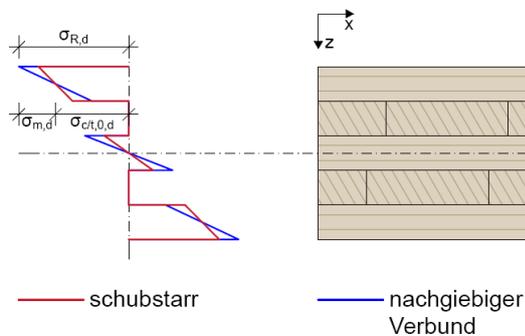


Abbildung 4: Einfluss des nachgiebigen Verbundes auf die Längsspannungen

3.1. Spannungsermittlung

Bei geklebtem BSP liefert die Spannungsermittlung nach der starren Verbundtheorie gemäß Anhang D2 der [DIN 1052] ausreichend genaue Ergebnisse, sofern ein Einfeldträger unter Gleichlast mit einem Verhältnis aus Spannweite l zu Elementdicke d von $l/d > 20$ vorliegt. Davon abweichende Systeme sind unter Berücksichtigung der Schubverformung zu berechnen. Für die Bemessung nach der starren Verbundtheorie ist es ausreichend, nur die Längslagen parallel zur Spannrichtung zur Lastabtragung anzusetzen (Abbildung 5). Bestehen die Längslagen aus Brettlamellen der gleichen Festigkeitsklasse, so gelten für einen Plattenstreifen von einem Meter Breite nachfolgende Zusammenhänge:

$$I_{ef,x} = \sum d_{x,i}^3 / 12 + \sum d_{x,i} \cdot z_{s,i}^2 \quad \text{mit } i=1, 3, 5, \dots \quad (\text{Gl. 6})$$

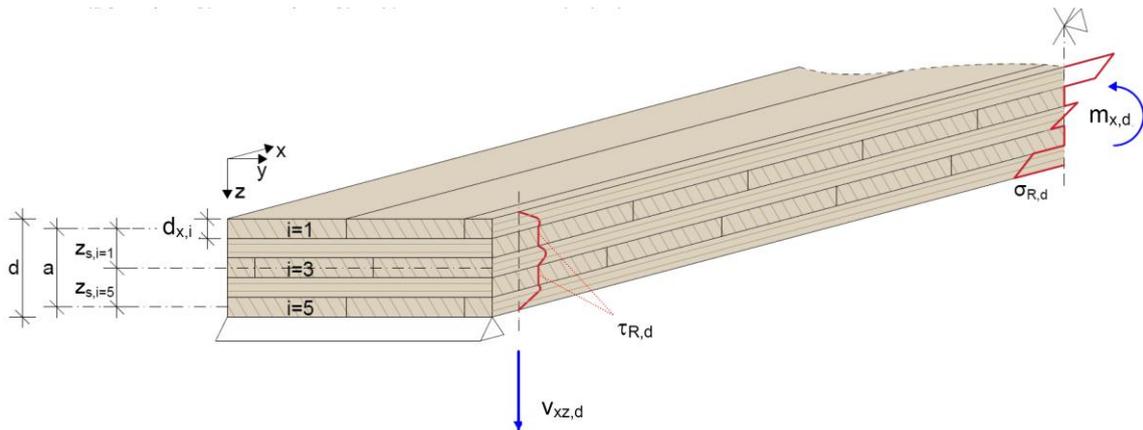


Abbildung 5: Plattenstreifen einer Brettsperrholzdecke

Die Biegezugspannung $\sigma_{R,d}$ der Decklage beträgt somit:

$$\sigma_{R,d} = \frac{m_{x,d}}{I_{ef,x}} \cdot d/2 \quad (\text{Gl. 7})$$

Unter der Annahme eines konstanten Schubflusses lässt sich die für die Schubbemessung maßgebende Rollschubspannung aus der vorherrschenden Querkraft $v_{xz,d}$ sowie dem Schwerpunktabstand a der Decklagen abschätzen:

$$\tau_{R,d} = \frac{v_{xz,d}}{a} \quad (\text{Gl. 8})$$

Für drei- und fünfschichtige Elemente stimmt die Rollschubspannung nach (Gl. 8) annähernd mit der exakten Lösung überein. Doch bereits bei einem siebenschichtigen Element liegt die maßgebende Rollschubspannung ca. 20% über dem Wert dieser Abschätzung. Mit zunehmender Anzahl von Schichten nimmt die Abweichung weiter zu und konvergiert gegen den Grenzwert von 50%. Für Elemente mit mehr als fünf Schichten empfiehlt es sich daher die Rollschubspannung nach folgender Gleichung zu bestimmen.

$$\tau_{R,d} = \frac{v_{xz,d} \cdot S_{ef,x}}{I_{ef,x}} \quad (\text{Gl. 9})$$

3.2. Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Aufgrund der aktuell erteilten bauaufsichtlichen Zulassungen für geklebtes Brettsperrholz ist es unter reiner Biegebeanspruchung ausreichend, die Biegezugspannungen nachzuweisen. Auf den kombinierten Nachweis der Schwerpunkts- und Biegespannungen wird verzichtet. Dabei darf der Bemessungswert der Biegefestigkeit mit dem Systembeiwert k_i multipliziert werden.

$$\text{Systembeiwert: } k_i = \min \begin{cases} 1 + n \cdot 0,025 \\ 1,1 \end{cases} \quad (\text{Gl. 10})$$

mit: n = Anzahl der nebeneinander liegenden Bretter in den Decklagen

Folgende Spannungsnachweise sind zu führen:

- Biegezugspannung: $\frac{\sigma_{R,d}}{k_i \cdot f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Gl. 11})$

- Rollschubspannung: $\frac{\tau_{R,d}}{f_{R,d}} \leq 1 \quad (\text{Gl. 12})$

Die Bemessungswerte der Zug- bzw. Druck- und Biegefestigkeiten sind von der Festigkeitsklasse der verwendeten Brettlamellen abhängig und können aus den charakteristischen Festigkeitswerten nach Anhang F der [DIN 1052] bestimmt werden. Für den charakteristischen Wert der Rollschubfestigkeit gelten die in den Zulassungen der jeweiligen Produkte angegebenen Werte. Diese variieren zwischen 0,70 N/mm² und 1,25 N/mm² für Fichtenholz. Für Kiefernholz sind gewöhnlich geringfügig höhere Werte angegeben.

Liegen kombinierte Beanspruchungen vor, so sind die Angaben zu den kombinierten Längs- und Schubspannungsnachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit in Abschnitt 10.7 der [DIN 1052] zu beachten. Bei der Bemessung eines Plattenstreifens unter Gleichlast, wie in Abbildung 5 dargestellt, sind die kombinierten Spannungsnachweise gewöhnlich nicht erforderlich.

3.3. Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind die Verformungsnachweise nach Abs. 9.2 der [DIN 1052] zu führen. Bei Verformungsberechnungen sollte der Anteil der Schubverformung in jedem Fall berücksichtigt werden. Die Verformung kann allgemein anhand des Arbeitssatzes bestimmt werden:

$$w = w_m + w_v = \frac{1}{E_{x,mean} \cdot I_{ef,x}} \cdot \int m_x \cdot \bar{m}_x \cdot dx + \frac{1}{S_{xz}} \cdot \int v_{xz} \cdot \bar{v}_{xz} \cdot dx \quad (\text{Gl. 13})$$

mit $E_{x,mean}$: Mittelwert des Elastizitätsmoduls der Brettlagen in x-Richtung
Bei einem Einfeldträger unter der charakteristischen Gleichlast q_k beträgt die Durchbiegung:

$$w = w_m + w_v = \frac{5 \cdot q_k \cdot l^4}{384 \cdot E_{x,mean} \cdot I_{ef,x}} + \frac{q_k \cdot l^2}{8 \cdot S_{xz}} \quad (\text{Gl. 14})$$

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind gemäß Abs. 9.2 der [DIN 1052] folgende Verformungsnachweise zu führen.

- charakteristische (seltene) Bemessungssituation

$$w_{Q,inst} \leq l/300 \quad (\text{Kragträger } l_k/150) \quad (\text{Gl. 15})$$

$$w_{fin} - w_{G,inst} \leq l/200 \quad (\text{Kragträger } l_k/100) \quad (\text{Gl. 16})$$

$$\text{mit: } w_{fin} = w_{G,fin} + w_{Q,fin} = w_{G,inst} \cdot (1 + k_{def}) + w_{Q,inst} \cdot (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) \quad (\text{Gl. 17})$$

- quasi-ständige Bemessungssituation

$$w_{fin} - w_0 \leq l/200 \quad (\text{Kragträger } l_k/100) \quad (\text{Gl. 18})$$

$$\text{mit: } w_{fin} = w_{G,fin} + w_{Q,fin} = w_{G,inst} \cdot (1 + k_{def}) + \psi_{2,1} \cdot w_{Q,inst} \cdot (1 + k_{def}) \quad (\text{Gl. 19})$$

Um bei Decken unter Wohn- und Aufenthaltsräumen Unbehagen verursachende Schwingungen zu vermeiden, ist zusätzlich ein Schwingungsnachweis nach Abs. 9.3 der [DIN 1052] zu erbringen. Die Durchbiegung von Deckenelementen unter ständiger und quasi-ständiger Einwirkung ($q_{perm} = g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$) ist auf den Grenzwert von 6,0 mm zu beschränken. Dies entspricht einer Eigenfrequenz der Decke von ca. 7,2 Hz. Bei Mehrfeldträgern ist der Nachweis im Feld der größten Spannweite zu führen, wobei die elastische Einspannung in die Nachbarfelder berücksichtigt werden darf. Wird der vereinfachte Schwingungsnachweis nicht eingehalten, so sind besondere Untersuchungen zum Schwingungsverhalten zu führen. Nähere Angaben hierfür sind unter anderem in [Hamm/Richter] enthalten.

3.4. Vorbemessungsdiagramm für den Einfeldträger unter Gleichlast

Bei den baupraktisch üblichen Abmessungen wird in der Regel nicht einer der Spannungsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit, sondern der vereinfachte Schwingungsnachweis mit einer Durchbiegungsbegrenzung unter quasi-ständiger Einwirkung maßgebend. Daher ist in Abbildung 6 ein Vorbemessungsdiagramm für einen Einfeldträger unter Gleichlast aufgeführt. Dem Diagramm liegt die Verformungsbegrenzung von 6,0 mm unter ständiger und quasi-ständiger Einwirkung ($q_{perm} = g_k + \psi_{2,1} \cdot q_k$) zugrunde. Bei Nutzlasten ist in der Regel $\psi_{2,1} = 0,3$ zu verwenden.

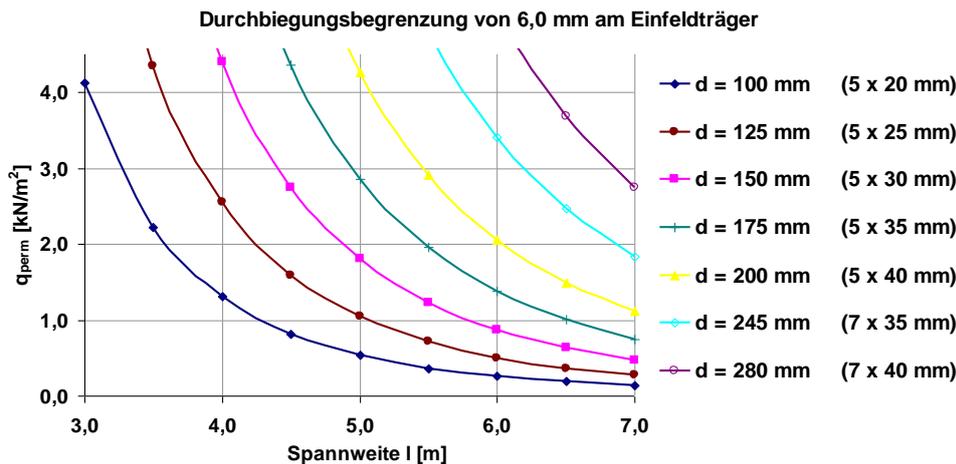


Abbildung 6: Vorbemessungsdiagramm

3.5. Öffnungen

Aufgrund des Querschnittaufbaus und der damit verbundenen orthogonalen Orientierung der einzelnen Brettlagen können in Brettspertholzelementen Öffnungen und Aussparungen angeordnet werden. Die Steifigkeiten in Nebentragrichtung, also in Richtung der Querlagen, sind zwar deutlich geringer als parallel zu den Decklagen, dennoch können dadurch im Bereich von Öffnungen Lasten umgelagert werden. Während Installationsöffnungen in wenig beanspruchten Randbereichen in der Regel keine Probleme darstellen, müssen größere Öffnungen, wie bei Treppenträumen oder Installationschächten, in jedem Fall nachgewiesen werden, da es im Bereich der Öffnungen zu Lastumlagerungen kommt, die gegebenenfalls zu Spannungsspitzen führen.

Allerdings hängen die beschriebenen Auswirkungen stark von der Belastung, den Steifigkeitsverhältnissen und vor allem von der Lage und der Geometrie der Öffnung ab. Auch die Elementierung der Bauteile und die Ausführung von Stoßfugen spielen dabei eine entscheidende Rolle. Folglich kann keine generelle Aussage getroffen werden, wann Verstärkungsmaßnahmen, Unterzüge oder Wechselkonstruktionen notwendig sind. Im Einzelfall hat daher eine Berechnung der Beanspruchungen unter Berücksichtigung der entsprechenden Randbedingungen zu erfolgen.

Eine Abschätzung der Lastumlagerung und Verformungen kann anhand einer orthotropen Plattenberechnung unter Verwendung eines geeigneten Statikprogramms erfolgen. Dabei setzt sich die Biegesteifigkeit der Platte aus effektiven Trägheitsmomenten und den Elastizitätsmoduln in den jeweiligen Tragrichtungen zusammen. Zusätzlich sind die Ersatzschubsteifigkeiten des Brettspertholzelementes getrennt für die Haupt- und Nebentragrichtung zu ermitteln und den Flächenelementen zuzuweisen. Aus den berechneten Schnittgrößen lassen sich anhand der zuvor aufgeführten Gleichungen (Gl. 7) und (Gl. 9) die Biegerand- und Rollschubspannungen bestimmen.

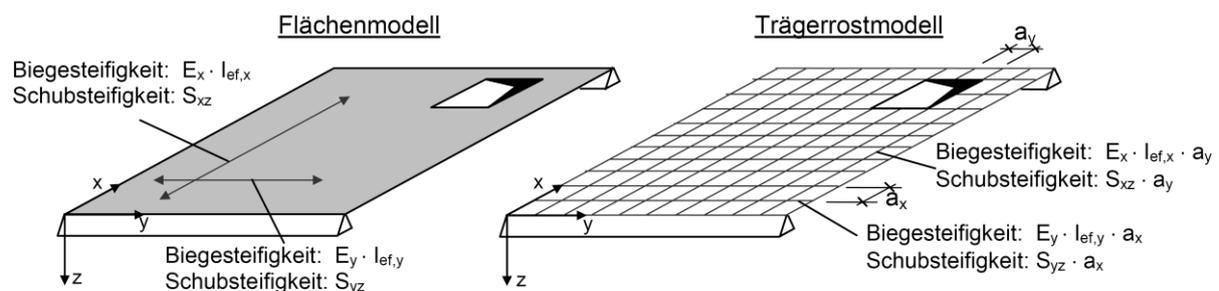


Abbildung 7: Berechnung eines Flächen- bzw. Trägerrostmodells mit Öffnung

Neben der Modellierung des Systems mit Flächenelementen besteht auch die Möglichkeit Trägerrostmodelle zu verwenden, die mit konventionellen Stabwerksprogrammen berechnet werden können. Dabei werden die flächigen Bauteile durch ein Raster von Rost-

stäben ersetzt, die sich an den Haupt- und Nebentragsrichtungen der einzelnen Brettlagen orientieren. Die Roststäbe besitzen die Steifigkeiten eines Plattenstreifens mit der Breite entsprechend des gewählten Rasterabstandes.

Beide Verfahren berücksichtigen jedoch nicht die Auswirkungen der Schubverformung auf die Spannungsverteilung. Da im Eckbereich eine konzentrierte Umlagerung von Spannungen stattfindet, kann es zu einem Anstieg der Biegerandspannung kommen, wie in Abbildung 4 dargestellt. Für detaillierte Untersuchungen stehen das Verfahren der Schubanalogie und spezielle FEM-Modellierungen zur Verfügung.

3.6. Punktstützung

In der Regel werden die Platten zweiseitig linienförmig gelagert und nur eine einachsige Lastabtragung unter Gleichlast wird berücksichtigt. Durch die Verwendung der großformatigen Elemente und unter Berücksichtigung der zweiachsigen Lastabtragung bieten sich mehrseitige und für anspruchsvolle Konstruktionen auch punktuelle Lagerungen an. Werden die Punktstützungen im Randbereich der Elemente angeordnet, so liegen dort in der Regel keine oder nur geringe Biegespannungen vor. Folglich werden in diesem Bereich die Schubbemessung und speziell die Rollschubfestigkeit der Querlagen maßgebend.

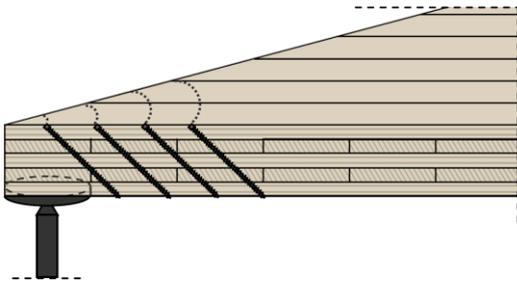


Abbildung 8: Schubverstärkung aus Vollgewindeschrauben im Bereich einer Punktstützung

Erste Versuche, die im Rahmen von Einzelprojekten durchgeführt worden sind, haben gezeigt, dass sich die Tragfähigkeit durch Verstärkungen im Bereich konzentrierter Lasteinleitung mittels diagonal angeordneter Vollgewindeschrauben deutlich verbessern lässt (Abbildung 8). Diese Bauweise ist jedoch weder in der [DIN 1052] geregelt noch liegen ausreichende Untersuchungen vor, die eine fundierte Modellbildung des Tragverhaltens unter Berücksichtigung der Verstärkungselemente zulassen. Daher sind derzeit für den Einsatz solcher schubverstärkter Brettsperrholzelemente Zustimmungen im Einzelfall erforderlich. In einem am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München laufendem Forschungsvorhaben werden Untersuchungen zum Tragverhalten von mit Vollgewindeschrauben verstärkten Brettsperrholzelementen durchgeführt und allgemeine Bemessungsregeln erarbeitet [Mestek/Winter 2011]. Der abschließende Forschungsbericht erscheint im Frühjahr 2011.

4. Wandelemente

Ein weiterer Anwendungsbereich für Bauteile aus Brettsperrholz liegt in tragenden und aussteifenden Wandelementen. Für die Abtragung der vertikalen Lasten aus Geschossdecken sind die Decklagen der Wandelemente vertikal anzuordnen. Bei der Bemessung von Wandscheiben im Wohnhaus-, Schul- und Gewerbebau ist es in der Regel ausreichend, die Wandscheiben näherungsweise unter Berücksichtigung von effektiven Steifigkeiten zu bemessen. Für die überwiegend normalkraftbeanspruchten Bauteile kann der Stabilitätsnachweis wahlweise nach dem Ersatzstabverfahren oder nach Theorie II. Ordnung geführt werden. Ausführliche Angaben für den Nachweis nach Theorie II. Ordnung sind in [Winter/Kreuzinger/Mestek] enthalten. Nachfolgend werden die Spannungsermittlung und die Nachweisführung für Wandelemente unter verschiedenen Beanspruchungsarten beschrieben.

4.1. Normalkraft- und Biegebeanspruchung

Zunächst wird die Vorgehensweise bei Wandelementen unter Normal- und Biegebeanspruchungen erläutert. Aus den vertikalen Lasten resultieren über die Einzelschichtdicke konstante Normalspannungen, während aus den horizontalen Windlasten senkrecht zur Elementfläche Biegebeanspruchungen wie bei Deckenelementen unter Plattenbeanspruchung entstehen. In beiden Fällen erfolgt die Lastabtragung ausschließlich über die vertikal angeordneten Brettlagen. Die resultierenden Spannungszustände sind in Abbildung 9 schematisch dargestellt.

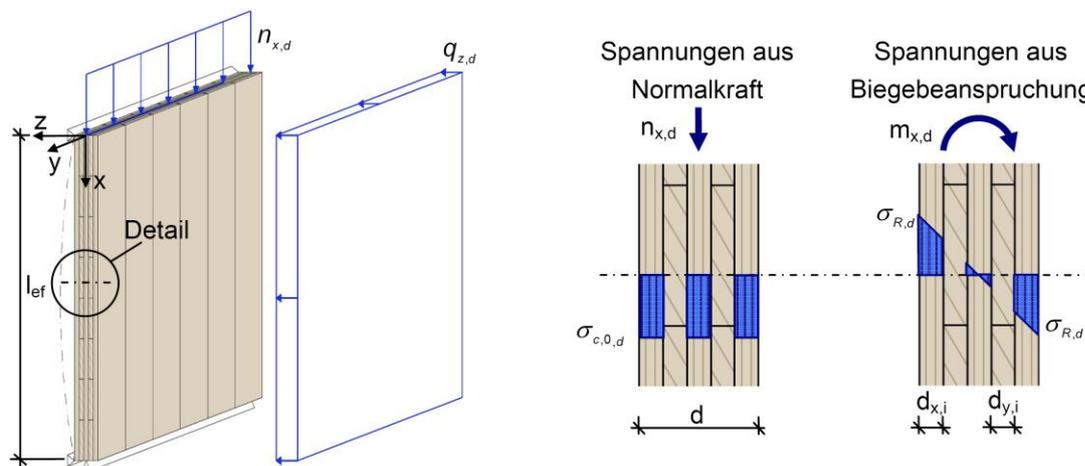


Abbildung 9: Wandscheibe unter Normalkraft- und Biegebeanspruchung

Für den Stabilitätsnachweis kann das Ersatzstabverfahren nach Abschnitt 10.3 der [DIN 1052] verwendet werden. Da dieses Verfahren die Schubverformung der Querlagen und den dadurch gegebenenfalls vorliegenden nachgiebigen Verbund der lastabtragenden Lagen nicht berücksichtigt, ist es nur bedingt für Brettspertholzkonstruktionen geeignet. Allerdings zeigen Untersuchungen am Einfeldträger, dass der Einfluss der Schubverformung der Querlagen auf die Normalspannungsverteilungen von geklebtem Brettspertholz vernachlässigbar gering ist, sofern ein Verhältnis der Spannweite l zu Elementdicke d von $l/d \geq 20$ vorliegt [Winter/Kreuzinger/Mestek]. Dies kann auf vertikal und horizontal beanspruchte Wandscheiben übertragen werden. Folglich empfiehlt es sich das Ersatzstabverfahren nur für Brettspertholzelemente zu verwenden, wenn das Verhältnis der Knicklänge l_{ef} zur Elementdicke d die nachfolgend angegebene Grenzbedingung einhält:

$$l_{ef} / d \geq 20 \quad (\text{Gl. 20})$$

Zusätzlich muss gemäß Abschnitt 10.7.3 der [DIN 1052] folgendes Kriterium erfüllt sein, da sonst die Schnittgrößen ebener Flächen mit Druckkräften aus Scheibenbeanspruchung nach Theorie II. Ordnung zu berechnen sind:

$$l_{ef} \cdot \sqrt{\frac{n_{x,d} \cdot \gamma_M}{E_{x,mean} \cdot I_{ef,x}}} \leq 1,0 \quad (\text{Gl. 21})$$

Dabei sind die Druckkraft $n_{x,d}$ sowie das effektive Trägheitsmoment $I_{ef,x}$ für einen Plattenstreifen mit einer Breite von einem Meter und der mittlere Elastizitätsmodul $E_{x,mean}$ der parallel zur Normalkraft verlaufenden Lagen einzusetzen.

Der Nachweis nach dem Ersatzstabverfahren für normalkraftbeanspruchte Elemente lautet:

- Nachweis unter planmäßig mittigem Druck:
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (\text{Gl. 22})$$

Die Druckspannungen in den parallel zur Normalkraft verlaufenden Lagen berechnet sich aus der Normalkraft $n_{x,d}$ und dem effektiv vorhandenen Nettoquerschnitt:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{n_{x,d}}{A_{ef,x}} \quad (\text{Gl. 23})$$

Zur Bestimmung des Knickbeiwertes k_c ist der Trägheitsradius zu ermitteln. Dieser berechnet sich unter Berücksichtigung des speziellen Querschnittsaufbaus nach Gleichung (Gl. 24).

$$i = \sqrt{\frac{I_{ef,x}}{A_{ef,x}}} \quad (\text{Gl. 24})$$

Analog zu Vollholz- oder Brettschichtholzbauteilen wird der Schlankheitsgrad der Brettsperrholzelemente aus dem Trägheitsradius und der Knicklänge l_{ef} ermittelt:

$$\lambda = l_{ef} / i \quad (\text{Gl. 25})$$

Anhand des Schlankheitsgrades und der in Abschnitt 10.3 der [DIN 1052] angegebenen Gleichungen kann anschließend der Knickbeiwert k_c berechnet werden. Dabei ist der für Brettschichtholz bzw. Holzwerkstoffe angegebene Beiwert β_c zu verwenden. Alternativ lässt sich der Knickbeiwert für Brettsperrholz aus Brettern der Güteklasse C 24 der Tabelle 1 entnehmen.

Tabelle 1: Knickbeiwert k_c

λ	k_c
0	1,00
10	1,00
20	1,00
30	0,97
40	0,94
50	0,87
60	0,75
70	0,61
80	0,48
90	0,39
100	0,32
110	0,27
120	0,23
130	0,19
140	0,17
150	0,15
160	0,13
170	0,12
180	0,10
190	0,09
200	0,08

*** Ermittelt für C 24 mit: $E_{0,05} = 2/3 \cdot 11000 \text{ N/mm}^2$, $f_{c,0,k} = 21 \text{ N/mm}^2$, $\beta_c = 0,1$**

Neben der Abtragung der vertikalen Lasten aus den einzelnen Geschossen können zusätzlich Biegebeanspruchungen aus Windlasten oder exzentrischen Lasteinleitungen auftreten. In diesem Fall ist der kombinierte Nachweis für "Stäbe mit Biegung und Druck" nach dem Ersatzstabverfahren zu führen:

- Nachweis unter kombinierter Beanspruchung:
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{R,d}}{k_m \cdot f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Gl. 26})$$

Die Biegerandspannung $\sigma_{R,d}$ der Decklage ist wie bei den Deckenelementen zu berechnen:

$$\sigma_{R,d} = \frac{m_{x,d}}{I_{ef,x}} \cdot d/2 \quad (\text{Gl. 27})$$

Der Kippbeiwert k_m in Gleichung (Gl. 26) darf $k_m = 1,0$ gesetzt werden, da bei den üblichen Abmessungen von Brettsperrholzbauteilen kein Kippen des Druckgurtes zu erwarten ist.

Bei der Ermittlung des Biegemomentes $m_{x,d}$ senkrecht zur Plattenebene ist zu berücksichtigen, dass aus exzentrischen Anschlüssen von Deckenelementen zusätzliche Biegemomentanteile entstehen können.

Für komplizierte, gekrümmte Tragstrukturen, die überwiegend durch Normalkräfte beansprucht sind, empfiehlt sich eine Berechnung nach dem Verfahren der Schubanalogie unter Verwendung des kombinierten Fachwerkmodells. Scholz beschreibt in [Kreuzinger/Scholz] und [Scholz, Diss.] ausführlich diese Vorgehensweise.

4.2. Horizontale Scheibenbeanspruchung

Die gekreuzte Anordnung der Brettlagen ermöglicht den Einsatz der Brettspertholzelemente für aussteifende Zwecke (Abbildung 10). Der aus einer horizontalen Kopflast resultierende Schubfluss erzeugt Schubbeanspruchungen in den einzelnen Brettlagen. Die horizontalen und vertikalen Schichten müssen getrennt voneinander betrachtet werden. Der Schubfluss in Elementebene aus einer horizontalen Kopflast F_d beträgt:

$$n_{xy,d} = F_d / l \quad (\text{Gl. 28})$$

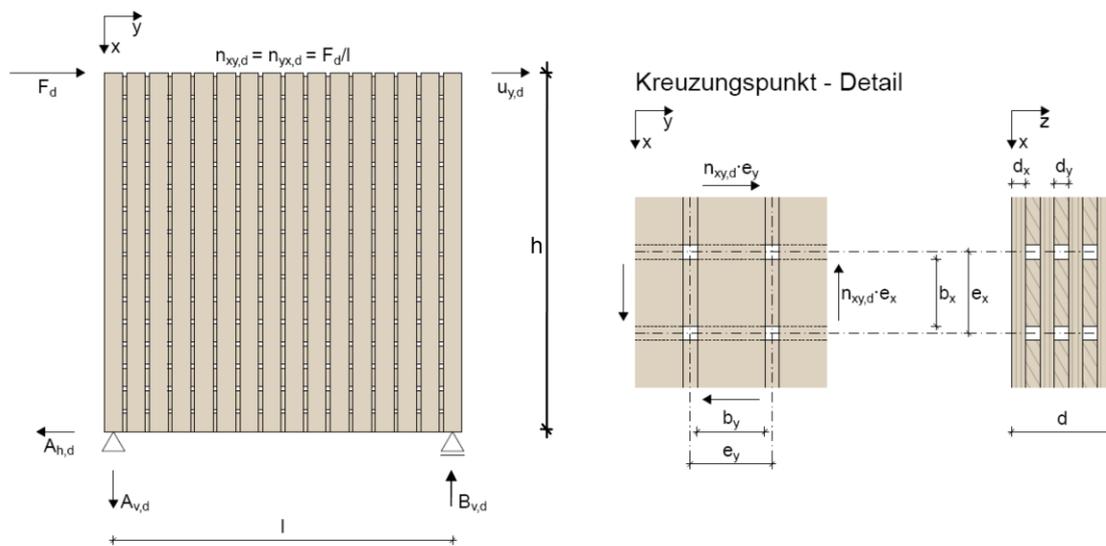


Abbildung 10: Wandscheibe unter horizontaler Scheibenbeanspruchung

Daraus resultieren folgende Schubspannungen in den

- vertikalen Lagen (x-Richtung):

$$\tau_{xy,d} = \frac{n_{xy,d} \cdot e_y}{b_y \cdot \sum d_{x,i}} \quad (\text{Gl. 29})$$

- horizontalen Lagen (y-Richtung):

$$\tau_{yx,d} = \frac{n_{xy,d} \cdot e_x}{b_x \cdot \sum d_{y,i}} \quad (\text{Gl. 30})$$

Bei einer fugenfreien Ausführung mit Schmalseitenverklebung gilt für die Schubspannungen:

$$\tau_{xy,d} = \tau_{yx,d} = \frac{n_{xy,d}}{d} \quad (\text{Gl. 31})$$

Die zu führenden Schubspannungsnachweise lauten:

$$\frac{\tau_{xy,d}}{f_{v,d}} \leq 1,0 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\tau_{yx,d}}{f_{v,d}} \leq 1,0 \quad (\text{Gl. 32})$$

Als charakteristische Schubfestigkeit $f_{v,k}$ ist derzeit gemäß Tabelle F.5 der [DIN 1052] für Bretter der Güteklasse C 24 der Wert $2,0 \text{ N/mm}^2$ zu verwenden. Allerdings zeigen aktuelle Untersuchungen, dass aufgrund der kreuzweise verklebten Brettlagen für Brettspertholzelemente unter Scheibenschubbeanspruchung deutlich höhere Schubfestigkeitswerte zu erwarten sind [Bogensperger et al.].

Liegt keine Schmalseitenverklebung der Brettlagen vor, so entstehen zusätzliche Torsionsmomente und damit Torsionsschubspannungen in den Kreuzungspunkten (Abbildung 11). Das Torsionsmoment eines Kreuzungspunktes beträgt:

$$M_{\varphi,d} = n_{xy,d} \cdot e_x \cdot e_y = F_d / l \cdot e_x \cdot e_y \quad (\text{Gl. 33})$$

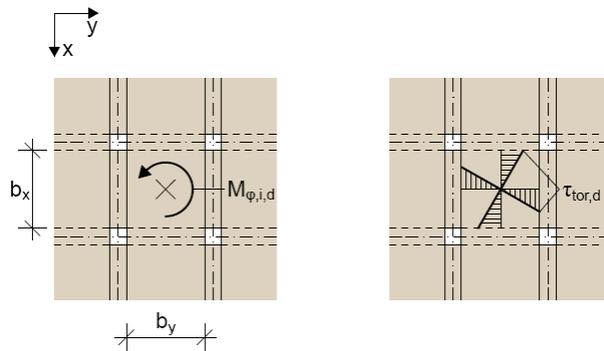


Abbildung 11: Torsionsschubspannung im Kreuzungspunkt

Unter der Annahme einer linearen Verteilung errechnet sich die in der Klebefuge eines Kreuzungspunktes zweier Brettlamellen wirkende maximale Torsionsschubspannung wie folgt:

$$\tau_{tor,d} = \frac{M_{\varphi,d}}{I_p} \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{1}{n-1} \quad (\text{Gl. 34})$$

$$\text{mit: } a = \max \begin{cases} b_x \\ b_y \end{cases} \quad (\text{Gl. 35})$$

$$I_p = \frac{b_x \cdot b_y^3}{12} + \frac{b_x^3 \cdot b_y}{12} \quad (\text{Gl. 36})$$

n = Anzahl der Brettlagen

Für die charakteristische Torsionsschubfestigkeit $f_{tor,k}$ ist in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen der Wert $2,50 \text{ N/mm}^2$ angegeben. Der Nachweis der Torsionsschubspannung im Grenzzustand der Tragfähigkeit lautet:

$$\frac{\tau_{tor,d}}{f_{tor,d}} \leq 1,0 \quad (\text{Gl. 37})$$

Für aussteifende Wandscheiben ist die Gleitung in xy -Ebene und die damit verbundene Scheibenschubsteifigkeit D_{xy} von Bedeutung. Sie kann für geklebtes Brettspertholz nach Anhang D der [DIN 1052] wie folgt ermittelt werden.

$$D_{xy} = \frac{1}{4} \cdot \sum G_{xy,i} \cdot d_i \quad (\text{Gl. 38})$$

Sind die einzelnen Bretter an den Schmalseiten miteinander verklebt, so darf die volle Elementdicke angesetzt werden:

$$D_{xy} = \sum G_{xy,i} \cdot d_i \quad (\text{Gl. 39})$$

Die horizontale Verschiebung $u_{y,d}$ am Wandkopf beträgt:

$$u_{y,d} = \gamma \cdot h = \frac{n_{xy,d}}{D_{xy}} \cdot h \quad (\text{Gl. 40})$$

Für aussteifende Wandscheiben fordert die [DIN 1052] eine Begrenzung der horizontalen Verformung $u_{y,d}$ am Wandkopf auf $u_{y,d} \leq h/100$. Dies mag unter dem Aspekt der Tragfähigkeit zwar ausreichend sein, aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit empfiehlt es sich jedoch, die Verschiebung $u_{y,k}$ auf $h/500$ zu begrenzen.

4.3. Fugen in Wandelementen

Bestehen die Wandscheiben aus mehreren Elementen, so sind die einzelnen Elemente schubsteif miteinander zu verbinden. Mögliche Ausführungsvarianten sind in Abbildung 12 enthalten. Die Stoßausbildung muss den Schubfluss in der Elementebene übertragen können. Der aus der horizontalen Kopflast F_d resultierende Schubfluss beträgt:

$$n_{xy,d} = F_d / l \quad (\text{Gl. 41})$$

Bei einer Ausführung mit einseitiger Lasche (siehe Variante a) in Abbildung 12) beträgt die aus dem in der Stoßfuge wirkende Schubfluss $n_{xy,d}$ resultierende Kraft N_{VBM} je Verbindungsmittel:

$$N_{VBM} = n_{xy,d} \cdot e_{VBM} = F_d / l \cdot e_{VBM} \quad (\text{Gl. 42})$$

Ist die Lasche beidseitig angeordnet (siehe Variante b) in Abbildung 12), so halbiert sich die in Gleichung (Gl. 42) angegebene Beanspruchung je Verbindungsmittel. Die Verbindungsmittel und die Stoßlasche sind nach den allgemeinen Bemessungsregeln gemäß [DIN 1052] nachzuweisen.

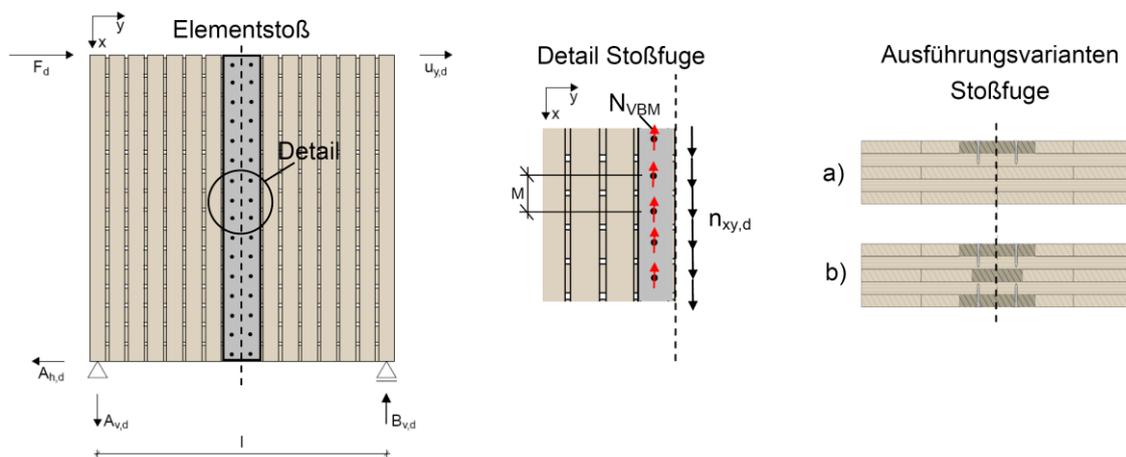


Abbildung 12: Wandscheibe unter horizontaler Scheibenbeanspruchung - Stoßfuge

4.4. Fensterstürze und wandartige Träger (Deckenscheiben)

Fenster- und Türöffnungen können aus Wandelementen ausgeschnitten und ohne zusätzliche Sturzkonstruktionen ausgeführt werden. Dazu ist der verbleibende Brettspertholzquerschnitt als Sturz zu betrachten und auf die entsprechenden Belastungen zu bemessen. Für die Bemessung von Stürzen oder wandartigen Trägern ist es günstig, wenn die horizontal verlaufenden Brettlagen an den Schmalseiten miteinander verklebt sind. Durch die Verklebung der Schmalseiten sind die horizontalen Brettlamellen starr miteinander verbunden, so dass keine Nachgiebigkeit berücksichtigt werden muss. In diesen Fällen erfolgt die Spannungsberechnung und Bemessung an einem Rechenquerschnitt, dessen Abmessungen sich aus der Sturzhöhe h_s und einer wirksamen Ersatzdicke d_{ef} ergeben (Abbildung 13). Für die wirksame Ersatzdicke d_{ef} gilt:

$$d_{ef} = \sum d_{y,i} \quad (\text{Gl. 43})$$

mit $d_{y,i}$: Dicke der horizontalen Lamellen

Vereinfacht ist als Ersatzsystem ein Einfeldträger mit einer Spannweite, die der Breite der Öffnung entspricht, zu wählen.

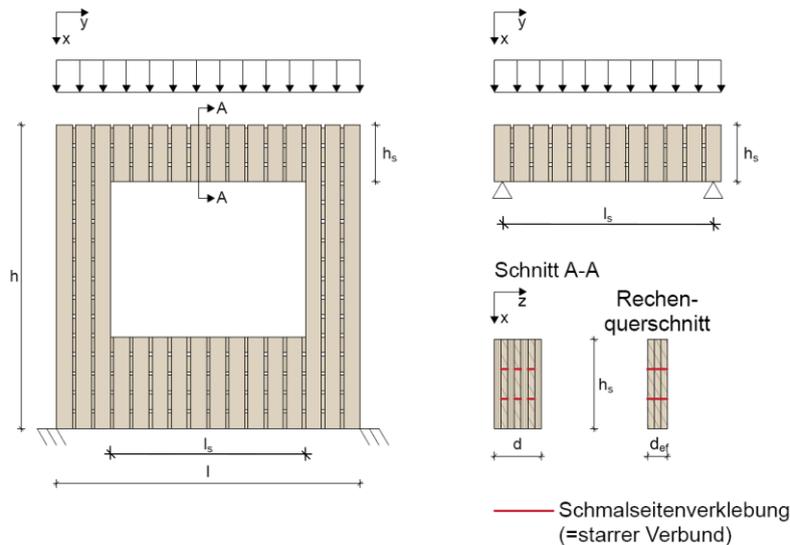
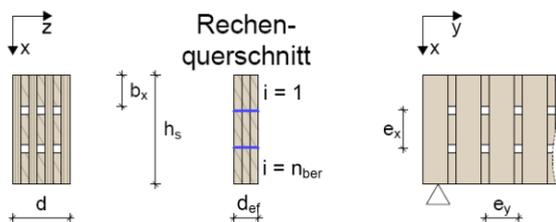


Abbildung 13: Fenstersturz – Rechenquerschnitt bei Schmalseitenverklebung

Fugen an den Schmalseiten der horizontalen Brettlagen bewirken, dass die einzelnen Lamellen nicht starr, sondern nachgiebig miteinander verbunden sind (Abbildung 14). Die Nachgiebigkeit resultiert aus der Schubverformung der Kreuzungspunkte der horizontalen und vertikalen Brettlamellen. Das Verformungsbild der Kreuzungspunkte ist vergleichbar mit dem, das sich bei einer Wandscheibe unter Beanspruchung einer horizontalen Kopflast in Elementebene einstellt. Dementsprechend kann die Nachgiebigkeit und damit die Ersatzschubsteifigkeit des Sturzes S_{xy} aus der Scheibenschubsteifigkeit D_{xy} des Wandelementes abgeleitet werden:

$$S_{xy} = D_{xy} \cdot h_s \quad (\text{Gl. 44})$$

mit: D_{xy} : Scheibenschubsteifigkeit
 h_s : Höhe des Sturzes



— nachgiebiger Verbund
 Anzahl der Bretter je horizontaler Lage:
 $n_{ber} = h_s / e_x$ (abrunden auf ganze Zahl)

Abbildung 14: Fenstersturz – Rechenquerschnitt ohne Schmalseitenverklebung

Der Rechenquerschnitt ist in Abbildung 14 dargestellt. Für die weitere Berechnung ist die Anzahl der übereinander liegenden Bretter in den horizontalen Brettlagen zu ermitteln. Es dürfen nur vollständige Bretter angesetzt werden. Die Spannungen in den Brettlagen sind unter Berücksichtigung der Schubverformung beispielsweise nach dem Verfahren der Schubanalogie zu berechnen. Diese Vorgehensweise und ein erläuterndes Beispiel sind in [Winter/Kreuzinger/Mestek] enthalten.

Ist der Ersatzquerschnitt bei einer Berechnung als Einfeldträger nicht ausreichend tragfähig, so können genauere Untersuchungen unter Berücksichtigung des Einspanngrades des Sturzes an den Enden der Aussparung erfolgen. Allerdings liegen derzeit keine ausreichenden Untersuchungen zu der Größe des Einspanngrades vor. Alternativ kann die Einspannung über eine elastische Bettung simuliert werden (Abbildung 15).

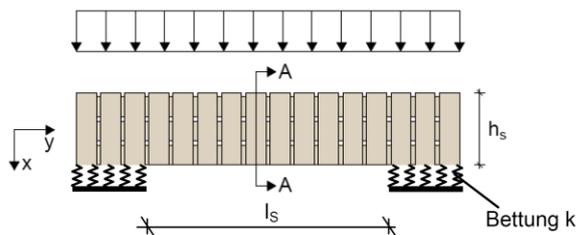


Abbildung 15: Fenstersturz mit elastischer Bettung

Die Steifigkeit der elastischen Bettung beträgt dabei:

$$k = \frac{A_{\text{ef},x} \cdot E_x}{h} \quad (\text{Gl. 45})$$

mit: $A_{\text{ef},x}$ Effektiver Nettoquerschnitt in x-Richtung (je Meter Breite)
 E_x Elastizitätsmodul der vertikalen Bretter (in x-Richtung)
 h Wandhöhe

5. Verbindungstechnik

Aufgrund der großformatigen Elementabmessung treten Fügungspunkte wie Stoßfugen oder Bauteilanschlüsse in begrenztem Maße auf. Dennoch ist deren fachgerechte Ausführung bedeutend für die statische und bauphysikalische Funktionalität der Gebäude. Während aus statischen Gesichtspunkten eine kraftschlüssige Verbindung zur Weiterleitung von Beanspruchungen zwischen den einzelnen Bauteilen erforderlich ist, muss gleichzeitig sichergestellt sein, dass die Dichtheit der Anschlüsse für den Schallschutz, den Brandschutz und die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle gewährleistet ist.

Die statischen Anforderungen werden üblicherweise durch konventionelle stiftförmige Verbindungsmittel erreicht. Hier sind vor allem selbstbohrende Voll- bzw. Teilgewindeschrauben zu nennen, die aufgrund ihrer leichten Handhabung eine einfache Montage garantieren und dabei leistungsfähige Anschlüsse erzeugen. Häufig werden die selbstbohrenden Schrauben auch in Verbindung mit Stahlteilen verwendet. Ihre größte Leistungsfähigkeit erreichen sie, wenn sie in Richtung der Schraubenachse beansprucht werden, aber auch Beanspruchungen rechtwinklig zur Stabachse können übertragen werden. Darüber hinaus sind Stabdübel- bzw. Bolzen- und Passbolzenverbindungen sowie in seltenen Fällen Anschlüsse mittels Dübel besonderer Bauart möglich. Ausführliche Informationen zur Verbindungstechnik sind in [Blaß, Uibel] enthalten.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Artikels wird auf wesentliche Tragsysteme und Bemessungssituationen von Brettspertholz eingegangen und die entsprechenden Vorgehensweisen bei der Berechnung und der Bemessung erläutert. Zunächst erfolgen allgemeine Angaben zu Berechnung der effektiv vorliegenden Querschnitts- und Steifigkeitswerte, wobei ausschließlich die Brettlagen berücksichtigt werden, die entscheidend zu Lastabtragung beitragen. Anschließend werden für unterschiedliche Tragsysteme die Spannungs- und Verformungsberechnung beschrieben und die zu erbringenden Nachweise aufgeführt.

Liegt eine Plattenbeanspruchung von Brettspertholz vor, so werden unter üblichen Abmessungen und Belastungen nicht die Spannungsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit, sondern die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit maßgebend. In der Regel bestimmt daher der Schwingungsnachweis die Dimensionierung der Deckenelemente. Während nur bei gedungenen Systemen der Einfluss der Schubverformung der Querlagen auf die Spannungsverteilung zu beachten ist, sind die Verformungsanteile infolge der Schubverformung bei den Verformungsberechnungen in jedem Fall zu berücksichtigen.

Der Stabilitätsnachweis von Wandelementen unter vertikaler Scheibenbeanspruchung darf in der Regel nach dem Ersatzstabverfahren erfolgen. Gleiches gilt unter kombinierter Beanspruchung mit zusätzlichen Biegeanteilen aus Windbelastungen oder exzentrischer

Lasteinleitung. Bei horizontaler Scheibenbeanspruchung sind die einzelnen Elemente einer Wand schubsteif miteinander zu verbinden oder jedes einzelne Element entsprechend zu verankern.

Im Bereich von Sturzbauteilen oder wandartigen Trägern, ergibt sich der Restquerschnitt aus den senkrecht zur Lastrichtung verlaufenden Brett lamellen. Liegt eine Schmalseitenverklebung vor, so darf die gesamte Sturzhöhe angesetzt werden. Ohne Schmalseitenverklebung muss theoretisch der aus der Schubverformung resultierende nachgiebige Verbund der einzelnen Bretter berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang und vor allem auch hinsichtlich eines anzusetzenden Einspanngrades der Sturzbauteile besteht sicherlich noch Forschungsbedarf.

7. Literatur

- [CUAP 03.04/06] Common Understanding of Assessment Procedure: "Solid wood slab element to be used as a structural element in buildings"; ETA request No 03.04/06.
- [DIN EN 338] DIN EN 338:2003-09: Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen.
- [DIN 4074-1] DIN 4074-1:2008-12: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil1: Nadelschnittholz.
- [DIN 1052] DIN 1052: 2008-12: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.
- [DIN V ENV 1995-1-1] DIN V ENV 1995-1-1: 1994-06: Eurocode 5 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken; Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau.
- [Blaß, Uibel] Blaß, H.J.; Uibel, T.: Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettspertholz, Karlsruher Bericht zum Ingenieurholzbau 8, Universitätsverlag Karlsruhe, 2007.
- [Bogensperger et al.] Bogensperger, T.; Moosbrugger, T.; Silly, G.: Verification of CLT-plates under loads in plane. WCTE 2010, Riva del Garda, Italy, 2010.
- [Hamm/Richter] Hamm, P.; Richter, A.: Bemessungs- und Konstruktionsregeln zum Schwingungsnachweis von Holzdecken. Fachtagung Holzbau 2009, Leinfelden-Echterdingen. Hrsg.: Landesbeirat Holz Baden-Württemberg e.V., Stuttgart. S. 15-29, 2009.
- [Kreuzinger/Scholz] Kreuzinger, H.; Scholz, A.: Flächentragwerke – Berechnung und Konstruktion. AiF Forschungsvorhaben – Schlussbericht, TU München, 2003.
- [Mestek/Winter 2010] Mestek, P.; Winter, S.: Berechnung und Bemessung von Brettspertholz – ein Überblick. Fachtagung Holzbau 2010, Leinfelden-Echterdingen. Hrsg.: Landesbeirat Holz Baden-Württemberg e.V., Stuttgart. S. 23-40, 2010.
- [Mestek/Winter 2011] Mestek, P.; Winter, S.: Konzentrierte Lasteinleitung in Brettspertholzkonstruktionen – Verstärkungsmaßnahmen. AiF-Forschungsvorhaben, TU München, Abschlussbericht voraussichtlich 05/2011.
- [Scholz, Diss.] Scholz, A.: Ein Beitrag zur Berechnung von Flächentragwerken aus Holz. Dissertation, TU München, 2004.
- [Winter/Kreuzinger/Mestek] Winter, S.; Kreuzinger, H.; Mestek, P.: Brettstapel, Brettspertholz und Verbundkonstruktionen. Teilprojekt 15 des HTO-Verbundforschungsvorhabens „Holzbau der Zukunft“. Abschlussbericht, TU München, Juni 2008.