

Mehrfach-Durchbrüche in Brettschichtholz

Tapia Camú

Cristóbal

Dipl. Ing.

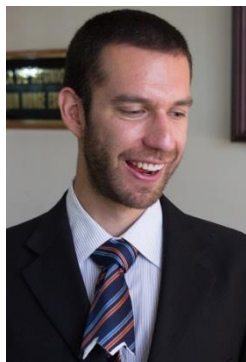
Wiss. Mitarbeiter

MPA Uni Stuttgart

Pfaffenwaldring 4b

70569 Stuttgart

**crislobal.tapia-
camu@mpa.uni-
stuttgart.de**



Aicher

Simon

Dr. rer. Nat

Abteilungsleiter

MPA Uni Stuttgart

Pfaffenwaldring 4b

70569 Stuttgart

**simon.aicher@mpa
.uni-stuttgart.de**



Cristóbal Tapia, geb. 1987, studierte Bauingenieurwesen an der Universidad de Chile. Er arbeitet seit Mai als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der MPA Universität Stuttgart, Abteilung Holzkonstruktionen. Dort beschäftigt er sich mit FE-Simulationen sowie mit experimentellen Untersuchungen.

Simon Aicher, geb. 1953, absolvierte das werkstoffwissenschaftliche Studium Holzwirtschaft an der Universität Hamburg, vertiefte Bauingenieurwesen an der TU München und promovierte 1984 am Institut für Holzphysik der Universität Hamburg. Er ist seit 2004 Leiter der Abteilung Holzkonstruktionen der MPA Universität Stuttgart.

Zusammenfassung

Der lichte Mindestabstand zwischen Durchbrüchen in Brettschichtholzträgern ist in DIN EN 1995-1-1/NA bei bewehrten und unbewehrten Durchbrüchen auf das ein- bzw. 1,5fache der Trägerhöhe festgelegt. In der Praxis werden jedoch aus verschiedenen Gründen manchmal kleinere Abstände benötigt, die so klein ausfallen können, dass sie durch ein fiktives größenmäßig zulässiges Loch umschrieben werden könnten. Die Auswirkungen reduzierter Lochabstände und der Fall eines umschriebenen Loches wurden mittels Finite Elemente Berechnungen und orientierend experimentell untersucht. Die Finite Elemente (FE)-Simulationen zeigten, dass sich die Querkzugspannungen an den Lochrändern erhöhen, je näher die Durchbrüche zueinander rücken. Gleichzeitig reduzieren sich aber die Querkzugkräfte zwischen den Durchbrüchen infolge der Interaktion zwischen den Druck- und Zugzonen an den Lochrändern während die Querkzugkräfte an den äußeren Rändern moderat zunehmen. Die Finite Elemente Berechnungen sowie erste experimentelle Untersuchungen deuten darauf hin, dass der Mindestabstand zumindest für gewisse Lochgrößen reduziert werden kann und, dass sehr eng beieinander liegende Löcher zutreffend durch ein fiktiv umschriebenes Loch behandelt werden können.

1. Einleitung

Die heutige Europäische Holzbaubemessungsnorm DIN EN 1995-1-1 (EC 5 Teil 1) [1] enthält keine Ausführungen zu Durchbrüchen in Vollwandträgern aus Brettschichtholz und Furnierschichtholz, ungeachtet deren offensichtlicher Bedeutung in Bauwerken. In Tragwerken

liegt nahezu immer die Erfordernis einer Durchführung von Elektro-, Sanitär- bzw. Lüftungsleitungen und -rohren rechtwinklig zu den Hauptträgern vor, die aus technischen und architektonischen Gründen nicht unterhalb der Binderebene ausgeführt werden können. Im Gegensatz dazu, enthält das deutsche nationale Anwendungsdokument DIN EN 1995-1-1/NA [2] ausführliche Bemessungsregeln zu unverstärkten und verstärkten Durchbrüchen. Die dort angegebenen Regeln wurden weitestgehend ungeändert aus der vormaligen deutschen Holzbau-bemessungsnorm DIN 1052:2008 [3] übernommen. Die im EC 5/NA [2] ausgeführten Regelungen fußen einerseits auf einer Reihe belastbarer rechnerischer und experimenteller Untersuchungen u.a. [4-8] beinhalten jedoch auch Vorgaben, die nicht auf belastbare Untersuchungen rückführbar sind. Hierzu zählen, unter anderem, die Regelungen zu Durchbruchsabständen bei mehreren in Reihe angeordneten Durchbrüchen. In diesem Zusammenhang erhebt sich die Frage, ob Unterschreitungen der vorgegebenen Mindestabstände wirklich kritisch sind. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob mehrere vergleichsweise eng beieinander liegende Durchbrüche zuverlässig durch ein umschreibendes großes Loch behandeln werden können. Diesen Fragestellungen wird im vorliegenden Beitrag, der durch einen praxisrelevanten Fall initiiert wurde, nachgegangen.

2. Regelungen zu Größen und Abständen von Durchbrüchen in DIN EN 1995-1-1/NA

Nach DIN EN 1995-1-1/NA [2], Abschnitt NCI NA.6.7 sowie Abschnitt NCI NA.6.8.4 gelten für unverstärkte und querzugverstärkte Durchbrüche in Brettschichtholz und Furnierschichtholz die in Bild 1 und Tabelle 1 gezeigten konstruktiven Ausführungsregelungen. Wie ersichtlich muss der lichte Abstand zwischen den benachbarten gegenüber liegenden vertikalen Rändern bzw. Berandungstangenten im Falle unverstärkter Durchbrüche mindestens das 1,5fache der Trägerhöhe und im Falle verstärkter Durchbrüche das einfache der Trägerhöhe h betragen. Im Mindesten muss der Abstand in beiden Fällen jedoch 300 mm betragen. Sofern die genannten Abstände eingehalten werden, gelten sodann die Bemessungsregeln für einfache

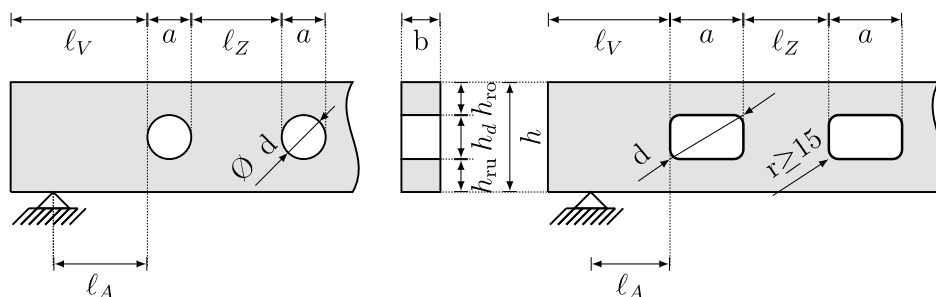


Bild 1: Abmessungsbezeichnungen von Durchbrüchen nach DIN EN 1995-1-1/NA [2]

Tabelle 1: Größen- und Geometrieregeln von verstärkten und unverstärkten Durchbrüchen in Brettschichtholz und Furnierschichtholz nach [2]

	l_V	l_Z	l_A	$h_{ro(ru)}$	a	h_d
unverstärkt	$\geq h$	$\geq 1,5h$, mindestens 300 mm	$\geq h/2$	$\geq 0,35 h$	$\leq 0,4 h$	$\leq 0,15 h$
verstärkt	$\geq h$	$\geq h$, mindestens 300 mm	$\geq h/2$	$\geq 0,25 h$	$\leq h$ $a/h_d \leq 2,5$	$\leq 0,3 h$ ^{a)} $\leq 0,4 h$ ^{b)}

a) Bei innen liegender Verstärkung

b) bei außen liegender Verstärkung

Durchbrüche.

Im Folgenden wird anhand einer parametrischen Untersuchung zur Änderung der Spannungsverläufe an der Peripherie von nebeneinanderliegenden runden Durchbrüchen aufgezeigt, welche Auswirkungen der Durchbruchabstand hat. Aufbauend hierauf wird sodann anhand eines Praxisfalls aufgezeigt, dass bei eng zusammenliegenden Durchbrüchen der Ansatz eines umschreibenden Durchbruchs gerechtfertigt ist. Abschließend werden die Ergebnisse einiger neuerer relevanter experimenteller Untersuchungen vorgestellt.

3. Numerische Untersuchungen zum Abstand von Durchbrüchen in Brettschichtholz

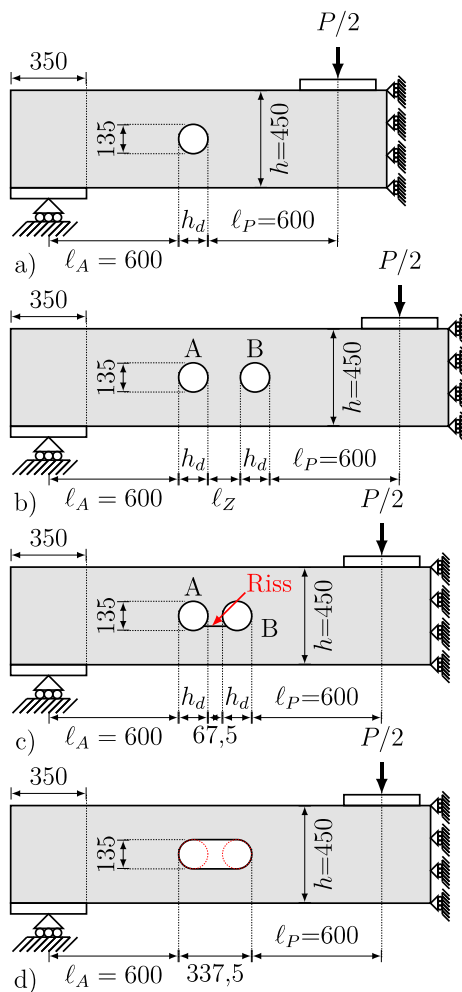


Bild 2: Abmessungen und Randbedingungen für die verschiedenen FE-Modelle

Abstand $l_Z = 67,5$ mm getrennt sind, womit das umhüllende Rechteckloch noch den normativen Seitenverhältnissen von $a/h_d = 2,5$ entspricht. Des Weiteren ist nun ein Riss zwischen den beiden Löchern angeordnet. Der in Bild 2d gezeigte zweite Sonderfall entspricht dem umschreibenden Loch der Konfiguration in Bild 2c mit $a = 2h_d + l_Z = 2 \times 135 + 67,5 = 337,5$ mm.

Die für einen ebenen Spannungszustand durchgeführten FE-Simulationen wurden mit dem Programm Abaqus V.6.14 vorgenommen. Das Modell besteht aus 8-knotigen, quadratischen,

3.1 Allgemeines

Die Finite Elemente (FE)-Berechnungen wurden in einem ersten Schritt am Beispiel eines Brettschichtholzträgers mit den, nachfolgend auch experimentell untersuchten Querschnittsabmessungen Breite $\times$ Höhe von $120 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ durchgeführt. Von dem in Vierpunktbiegung mit mittig sehr nahe nebeneinander angeordneten Lasten beanspruchten Träger wurde wie in Bild 2 gezeigt, aus Symmetriegründen lediglich eine Trägerhälfte berechnet. In den Berechnungen wurde zunächst ein in halber Trägerhöhe angeordnetes rundes Loch mit dem Durchmesser $h_d = 135 \text{ mm}$, somit $h_d/h = 0,3$, untersucht (Bild 2a). Der Auflagerabstand des auflagenahen Lochrandes betrug, ebenso wie bei allen nachfolgend untersuchten Mehrfach-Durchbruchskonfigurationen, $l_A = 600 \text{ mm}$. Der Abstand l_P des auflagerfernen Lochrandes von der Wirkungslinie der nächstgelegenen Last betrug ebenfalls 600 mm . Im Weiteren wurden sodann Konfigurationen mit zwei Löchern A und B gerechnet (vgl. Bild 2b), wobei die Position des auflagenahen Loches (A) unverändert blieb und der lichte Abstand l_Z zwischen dem ersten und zweiten Loch (B) systematisch geändert wurde, wobei der Abstand l_P immer 600 mm betrug.

Als einer der beiden Sonderfälle wurde sodann die Konfiguration in Bild 2c untersucht, bei der die beiden runden Durchbrüche durch einen sehr geringen lichten

2-dimensionalen Elementen (CPS8). Für die Auflager- und Lasteinleitungsplatten wurden starre Elemente (R2D2) verwendet. Als konstitutive Parameter wurden die Elastizitätswerte für einen homogen aufgebauten BSH-Träger der Festigkeitsklasse GL 32h gemäß DIN EN 14080 [4] angesetzt. Alle FE-Berechnungen wurden mit einer Last von $P = 100 \text{ kN}$ durchgeführt.

Bezüglich der Auswertungen der Berechnungen ist anzumerken, dass jeweils die Maximalwerte der Zugspannungen rechtwinklig zur Fasserrichtung in den beiden diagonalen gegenüberliegenden Zugspannungsfeldern jedes Lochs an der Lochsberandungsperipherie bestimmt wurden. Ausgehend von der Höchstspannungen wurden sodann horizontale Pfade definiert, längs derer die resultierenden Querzugspannungen durch Integration bestimmt wurden¹.

3.2 Ergebnisse der Parameterstudie zu ℓ_Z

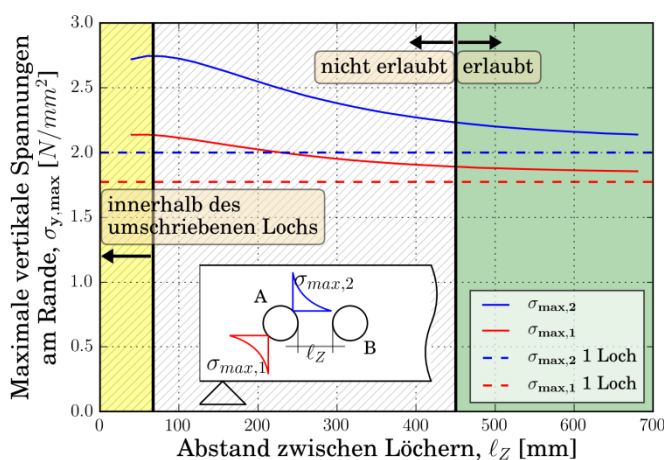


Bild 3: maximale Zugspannungen am Rande des auflagnahen Loches (A) für verschiedene Abstände ℓ_Z . Die gestrichelten Linien zeigen die maximalen Spannungen für den Fall des ausschließlichen Loches A

Bereich, in dem ein rechtwinkliges Loch, das beide Durchbrüche umschreibt, dem zulässigen Seitenverhältnis $a/h_d = 2,5$ entspricht. Der grüne Bereich kennzeichnet die Abstände ℓ_Z , die normativ zulässig sind. Die gestrichelten horizontalen roten und blauen Linien charakterisieren die maximalen Spannungen des Einzelloches unten links (1) bzw. am oberen rechten Rand (2).

Wie ersichtlich erhöhen sich die Maximalwerte der Querzugspannung an der Lochperipherie mit zunehmender Verkürzung des Abstandes ℓ_Z , wobei die Spannung $\sigma_{max,2}$, deren Ort der zunehmend näher kommenden Spannungsstörung näher liegt, deutlicher anwächst. Bei einer Reduzierung des Abstandes von $\ell_Z = 450 \text{ mm}$ auf $\ell_Z = 225 \text{ mm}$ bzw. 100 mm erhöht sich die Spannung $\sigma_{max,2}$ um 13% bzw. 23%. Bei absoluter Betrachtung sind die Spannungserhöhungen vergleichsweise gering.

Es werden zunächst die für die Rissinitiierung maßgeblichen Spannungshöchstwerte an der Lochperipherie und sodann die resultierenden Kräfte diskutiert. Bild 3 zeigt die Querzug-Höchstspannungen $\sigma_{max,1}$ und $\sigma_{max,2}$ am unteren linken und oberen rechten Rand des auflagnahen Loches (A) in Abhängigkeit vom Abstand ℓ_Z des rechts danebengelegenen Loches (B). Der in Bild 3 schraffiert angegebene Bereich markiert den unzulässigen Zwischenabstand ℓ_Z im Falle verstärkter Löcher. Der hierbei gelb hierlegte Bereich zwischen 0 und $\ell_Z = 67,5 \text{ mm}$ kennzeichnet den

¹ Die Maximalspannungen liegen erwartungsgemäß in hinreichend genauer Näherung bei rund 45° und 225° , vergleiche Bilder 3 und 4

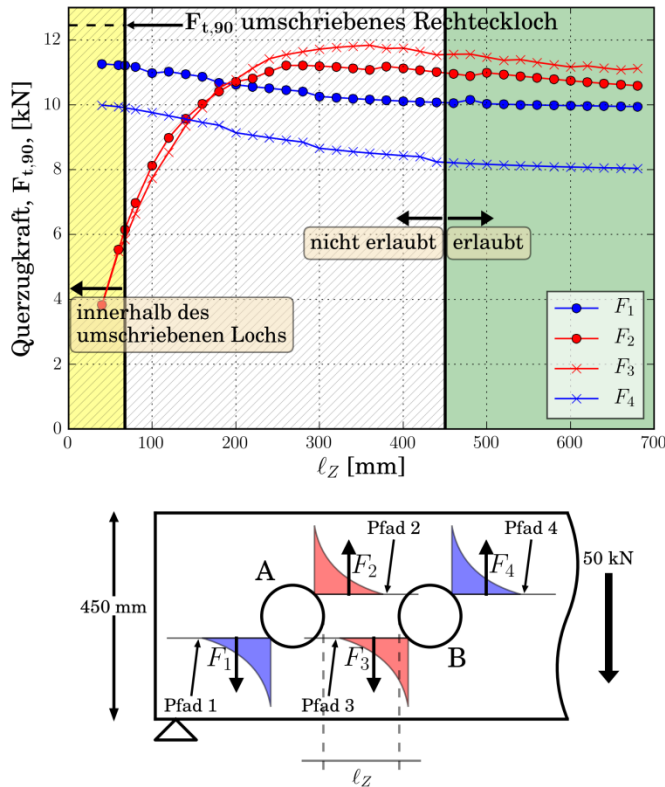


Bild 4: Kräfte quer zur Faserrichtung für einen Träger mit zwei Durchbrüchen für verschiedene Abstände ℓ_Z .

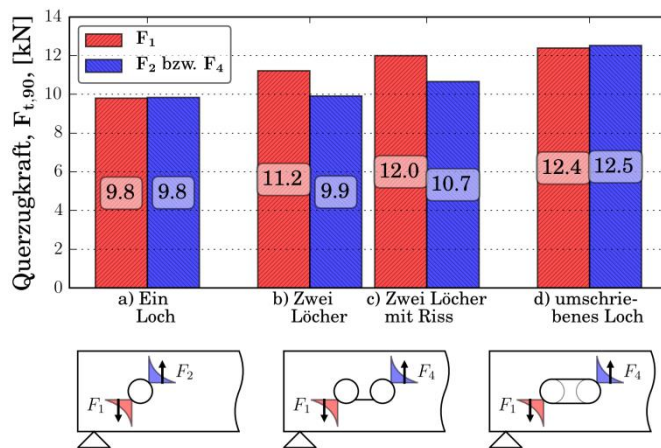


Bild 5: Kräfte quer zur Faserrichtung für die in Bild 2 gezeigten Konfigurationen (Bild 2a mit $\ell_Z=67,5$ mm)

$\ell_Z = 67,5$ mm), des Zwillingsloches gemäß Bild 2c ($\ell_Z = 67,5$ mm mit Durchriss zwischen den Löchern) und der Konfiguration mit dem umschriebenen Loch gemäß Bild 2d betrachtet. Bild 5 zeigt die hierfür berechneten Kräfte F_1 und F_2 am Einelloch bzw. F_1 und F_4 an den Zwillingslöchern. Die für die Konfigurationen Einfachloch und Zwillingsloch mit $\ell_Z = 67,5$ mm angegebenen Kräfte entsprechen den Kurvenverläufen in Bild 4. Wie im Weiteren ersichtlich, verändern sich die Kräfte infolge eines Durchrisses zwischen den beiden

In einem zweiten Schritt werden nunmehr die längs der Pfade 1 und 2 durch Integration erhaltenen resultierenden Kräfte F_1 und F_2 des Loches A sowie die Kräfte F_3 und F_4 des Loches B betrachtet. Bild 4 zeigt vergleichbar der Darstellung in Bild 3 nunmehr die Entwicklung der genannten Kräfte in Abhängigkeit vom lichten Abstand ℓ_Z . Wie ersichtlich nimmt das Niveau der Kräfte F_2 und F_3 , das bei zunehmender Verkürzung des Lochabstandes bis auf eine Entfernung von $h/2 = 225$ mm näherungsweise konstant ist, sodann progressiv extrem ab. Dies resultiert aus dem Sachverhalt, dass die Zugspannungsfelder um die Kräfte F_2 und F_3 zunehmend durch die näher heranrückenden, auf gleicher Querschnittshöhe liegenden Druckspannungsfelder D1 und D2 (vgl. Bild 6) überlagert werden. Im Gegensatz zu den Kräften F_2 und F_3 nehmen die Kräfte F_1 und insbesondere F_4 mit zunehmender Verkürzung des Abstandes ℓ_Z näherungsweise linear zu, wobei der Zuwachs absolut vergleichsweise niedrig ausfällt. So erhöhen sich die Kräfte F_1 und F_2 bei einer Reduzierung des Abstandes ℓ_Z auf $h/2$ bzw. 100 mm lediglich um 5% und 8% bzw. 10% und 15%

Im Weiteren werden nun vergleichend die resultierenden Querkraftkräfte der Einellochkonfiguration gemäß Bild 2a, des Zwillingsloches gemäß Bild 2b (mit

Löchern nur unwesentlich. Sowohl die Kräfte F_1 und F_4 erhöhen sich lediglich um rund 10%. Im Fall des umschriebenen Loches ergibt sich gegenüber dem nicht durchgerissenen Fall (b) bei der bemessungsrelevanten Kraft F_4 ein Anstieg von 25% und bei der Kraft F_1 eine Erhöhung von rund 10%. Der letztere Sachverhalt ist mechanisch plausibel darauf zurückzuführen, dass nunmehr gegenüber den Zwillingslöchern mit geringem Zwischenabstand die Stützung des oberen und unteren Riegels fehlt und aus der Rahmentragwirkung ein zusätzlicher Momentanteil entsteht. Dieser Momentenanteil ist bei der vorgeschlagenen Berechnung eines umschriebenen Loches, die vorschlagsgemäß für ein Rechteckloch durchzuführen ist, zu berücksichtigen. Die durchgeführten FE-Berechnungen bestätigen unmittelbar, dass bei näherungsweise korrekten analytischen Berechnungen von runden und rechteckigen Löchern, die umschriebene Situation bei der effektiv immer noch eine Zwischenstütze vorhanden ist, eine sehr konservative Lösung darstellt. Dies gilt auch für den Fall, dass sich Risse zwischen den Löchern einstellen.

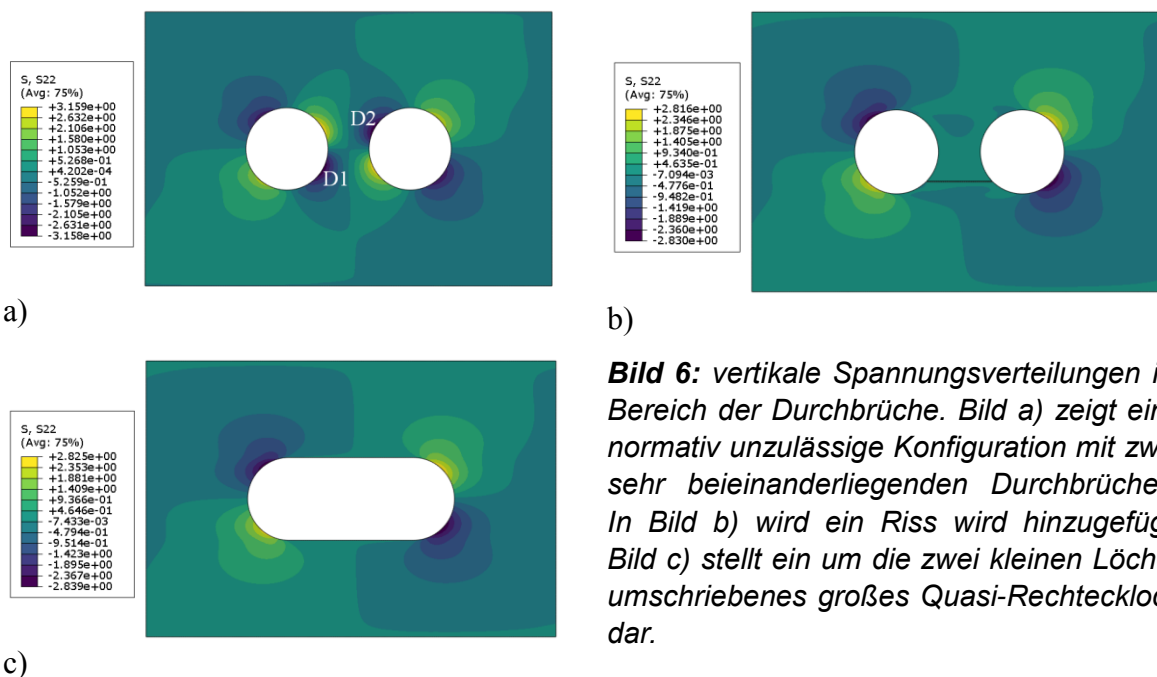


Bild 6: vertikale Spannungsverteilungen im Bereich der Durchbrüche. Bild a) zeigt eine normativ unzulässige Konfiguration mit zwei sehr beieinanderliegenden Durchbrüchen. In Bild b) wird ein Riss hinzugefügt. Bild c) stellt ein um die zwei kleinen Löcher umschriebenes großes Quasi-Rechteckloch dar.

4. Spannungsberechnungen zu einem Praxisfall mit nah beieinander liegenden Löchern

Im Zusammenhang mit einem konkreten Bauvorhaben ergab sich die Notwendigkeit der in Bild 7 gezeigten Durchbruchsanordnung in einem BSH-Träger. Wie ersichtlich war der lichte Abstand zwischen dem ausmittig angeordneten Rechteckloch und dem mittig angeordneten runden Loch gegenüber den ℓ_Z -Regelungen in [2] mit 155 mm wesentlich zu gering. Normativ müsste der Abstand 1250 mm betragen. Der Tragwerksplaner versuchte der speziellen Lochanordnung durch ein umschriebenes querzugbewehrtes Loch, das den zulässigen Größtmaßen entspricht, zu begegnen. Umschreibt man der vorhandenen Situation ein Rechteckloch, so liegt dieses bezüglich des Verhältnisses $h_d/h = 0,34$ über dem Grenzwert für schraubenbewehrte Löcher, jedoch unter dem Grenzwert $h_d/h = 0,4$ für plattenbewehrte Löcher. Berücksichtigt man für das runde Loch den aus der Lage des Spannungshöchstwertes und der Rissentwicklung resultierenden Sachverhalt, dass das runde Loch gemäß [2] mit $0,7 h_d$ angesetzt werden kann, so ergibt sich eine soeben noch vertretbare Abweichung ($h_d/h = 0,31$). Das Seitenverhältnis genügt unabhängig davon, ob der volle Lochdurchmesser oder lediglich 70%

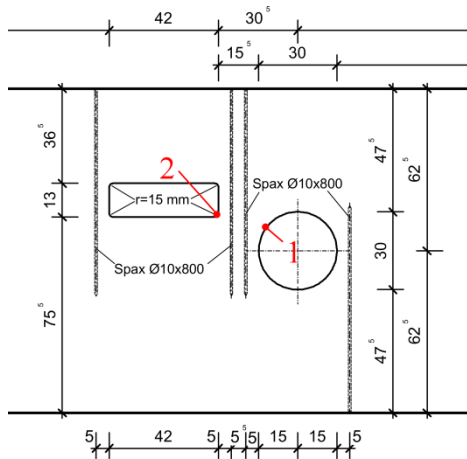


Bild 7: Nicht genehmigte Mehrfach-Durchbruchs-anordnung eines Praxisfalls

angesetzt werden, dem in Tabelle 1 genannten Verhältnis $a/h_d \leq 2,5$.

Die Berechnungen der skizzierten Konfiguration für den Fall einer Querkraft von 50 kN und ein Moment von 125 kN m und 169 kN m ergibt die in Bild 8 dargestellten Ergebnisse für die Querkzugkräfte $F_{t,90}$. Für den Fall eines wahrscheinlichen Durchrisses zwischen dem hochbeanspruchten oberen runden Höchstspannungsort 1 und dem gegenüberliegenden Höchstspannungsort 2 des Rechteckloches, ergibt sich eine bemessungsrelevante Erhöhung der durch Bewehrung aufzunehmenden Querkzugkraft F_1 von rd. 65% gegenüber dem nicht gerissenen Zustand. Die Querkzugkraft am Rechteckloch steigt etwa um den Faktor zwei.

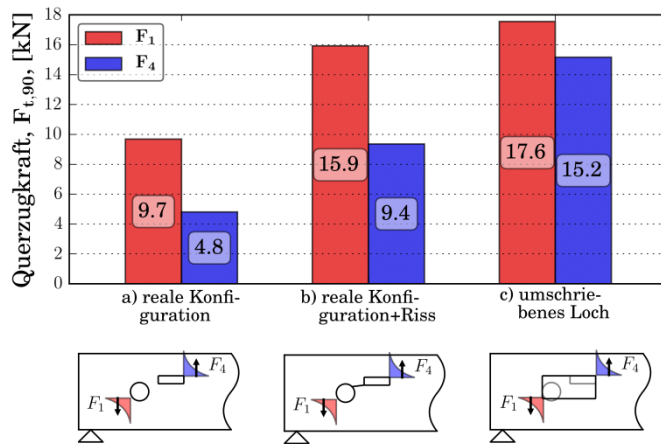


Bild 8: Querkzugkräfte für die angezeigten Zugzonen des untersuchten Praxisfalles. In der Konfiguration b) wird ein Durchriss zwischen beiden Löchern berücksichtigt. Querkraft: 50 kN.

Umschreibt man der realen Konfiguration das fiktive Rechteckloch, so erhöht sich die bemessungsrelevante Kraft nochmals um 10% und die Kraft F_4 erhöht sich um den Faktor 1,6. Bei ausreichender Bewehrung gegenüber den rechnerischen Kräften des fiktiv umschreibenden Loches, wird somit der real vorliegenden Konfiguration ausreichend konservativ Genüge geleistet. Eine eingehendere Betrachtung des Sachverhalts auch unter der Berücksichtigung der Schubspannungen im Lochbereich erfolgt in anderer Stelle. Die seitens der Autoren dieses Beitrags für korrekt erachtete Vorgehensweise wurde seitens des Prüfers leider nicht akzeptiert.

5. Experimentelle Untersuchungen an Mehrfachdurchbrüchen

5.1 Prüfprogramm und Versuchsdurchführung

Für die experimentellen Untersuchungen standen insgesamt sechs BSH-Träger der Festigkeitsklasse GL 32h mit den Querschnittsabmessungen Breite $\times$ Höhe = 120 mm $\times$ 450 mm und einer Länge von 3,5 m zur Verfügung. Die charakteristische Schubfestigkeit des speziellen Brettschichtholzes der Festigkeitsklasse GL 32h wurde in früheren Untersuchungen an einer gleichen Herstellcharge zu 3,6 N/mm² bestimmt. Es wurden die in Bild 9a bis f gezeigten Konfigurationen betreffend Einzel- und Zwillingslöcher untersucht. Die Prüfkörper 1 und 2 beinhalten (Bild 9a und b) die Einzellöcher. Das Loch B des Prüfkörpers 2 hatte den größten Auflagerabstand, der im Rahmen der Zwillingslöcherkonfigurationen untersucht wurde. Die

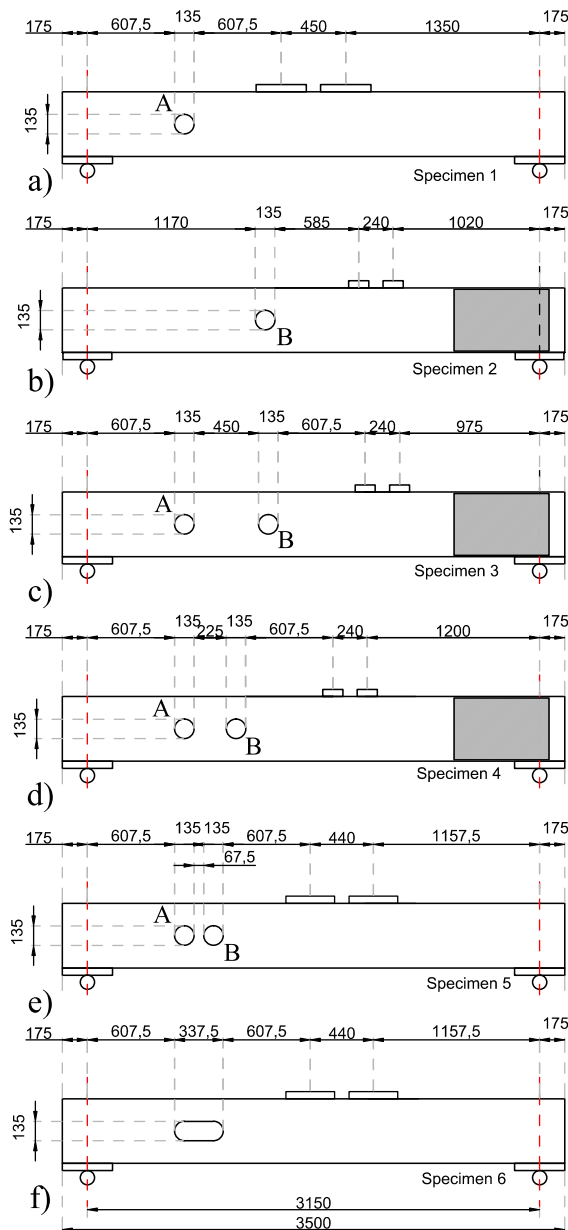


Bild 9: Abmessungen und Lastanordnung der experimentell untersuchten Durchbruchskonfigurationen (Einheiten in mm).

Prüfkörper 3, 4 und 5 beinhalteten Zwillingslöcher mit unterschiedlichen Abständen ℓ_Z mit Abständen von h , $h/2$ und $67,5$ mm. Der Prüfkörper 6 wies ein Quasi-Rechteckloch auf, das die Lochkonfiguration des Prüfkörpers 5 umschreibt.

Die Prüfkörper wurden in 4-Punktbiegung weggesteuert in einer servohydraulischen Prüfmaschine geprüft. Während des Versuches wurde die Rissentwicklung an den Lochrändern und insbesondere zwischen den beiden Löchern kontinuierlich aufgezeichnet. Bild 10 zeigt eine Ansicht des realisierten Versuchsaufbaus mit dem Prüfkörper 4 nach Erreichen der Traglast.

5.2 Versuchsergebnisse

Die Rissentwicklungen und das Tragverhalten der Träger wurden eindeutig durch den Lochabstand ℓ_Z beeinflusst. Hierauf wird detailliert an anderer Stelle eingegangen. Hier werden ausschließlich die Traglasten diskutiert. Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse.

Wie ersichtlich, lieferte der Einzeldurchbruch A gemäß Bild 9a mit dem niedrigsten Biegemoment die deutlich höchste Querkrafttragfähigkeit, während das Einzelloch B mit höherer Momentenbeanspruchung eine rd. 20% niedrigeren Querkrafttragfähigkeit aufwies. Anmerkung: Dieser Unterschied ist im Grunde zu hoch und ist in Verbindung mit den Festigkeitsstreuungen bei beiden Prüfkörpern 1 und 2 zu sehen.

Der Zwillingsdurchbruch mit einem Abstand entsprechend der Trägerhöhe h (Prüfkörper 3) ergab eine gleich hohe Tragfähigkeit wie die Einzeldurchbruchs-Konfiguration b (Prüfkörper 2). Die Zwillingsdurchbrüche mit reduzierten Lochabständen von $0,5h$ bzw. $0,15h$ (Prüfkörper 4 und 5) ergaben sodann rund 15% niedrige Tragfähigkeiten. Das umschriebene Quasi-Rechteckloch des Prüfkörpers 6 ergab erwartungsgemäß die niedrigste Tragfähigkeit, die rund 25% unterhalb der Durchbruchskonfiguration mit einem Abstand von h lag. Neben den Querkraften im Bruchzustand beinhaltet Tabelle 2 auch die an den Durchbruchsrändern auftretenden Momente (M_{u1} bis M_{u4}) sowie die hieraus mittels der Gleichungen (1) bis (5) nach [2], ermittelten maximalen Querkzugkräfte $F_{t,90,u}$.

Des Weiteren sind in Tabelle 2 die Verhältnisse der aus den Bruchquerkräften ermittelten Querkzugkräfte $F_{t,90,u}$ bezogen auf den charakteristischen und mittleren Querkzugwiderstand

gemäß Gl.(6) angegeben. Für die Ermittlung des charakteristischen Widerstandes wurde hierbei die charakteristische Querkzugfestigkeit von Brettschichtholz $f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ gemäß [9] angesetzt. Für den Mittelwert der Querkzugfestigkeit wurde plausibel ein Wert von $f_{t,90,mean} = 1,25 \times 0,5 = 0,625 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Neben den genannten Verhältniswerten beinhaltet Tabelle 2 auch die mittlere rechnerische Querkrafttragfähigkeit $V_{u,calc,mean}$ gemäß Gl. (7).

Tabelle 2: Zusammenstellung der experimentellen Ergebnisse

Prüfk. Nr.	ℓ_A mm	ℓ_z mm	N Loch	F_u kN	V_u kN	M_{u1} kN m	M_{u2} kN m	M_{u3} kN m	M_{u4} kN m	$F_{t,90,u}$ kN	$\frac{F_{t,90,u}}{R_{t,90,k}}$	$\frac{F_{t,90,u}}{R_{t,90,mean}}$	$V_{u,calc,mean}$ kN
1	607,5	---	1	136,0	68,0	41,3	50,5	---	---	13,1	1,50	1,20	56,9
2	1170	---	1	150,9	54,3	---	---	63,6	70,9	12,0	1,37	1,10	49,5
3	607,5	450	2	154,6	54,1	32,9	40,2	64,5	71,8	12,0	1,37	1,10	49,3
4	607,5	225	2	111,6	45,7	27,8	34,0	44,2	78,2	11,1	1,26	1,01	45,3
5	607,5	67,5	2	107,1	47,1	28,6	35,0	38,2	73,1	11,0	1,26	1,01	46,9
6	607,5	---	1	93,0	40,9	24,9	---	---	60,8	12,0	1,37	1,10	37,3



Bild 10: Realisierter Versuchsaufbau mit dem gebrochenem Prüfkörper gemäß Bild 9d

$$F_{t,V} = \frac{V \cdot h_d \cdot 0,7}{4 \cdot h} \left[3 - \frac{0,7^2 h_d^2}{h^2} \right] \quad (1)$$

$$F_{t,M} = 0,008 \cdot \frac{M_i}{h_r} = 0,008 \cdot \frac{V}{h_r} \ell_i \quad (2)$$

$$\ell_1 = \ell_A; \ell_2 = \ell_A + a; \ell_3 = \ell_A + a + \ell_z; \ell_4 = \ell_A + 2a + \ell_z \quad (3a-f)$$

$$F_{t,90} = F_{t,V} + F_{t,M} = V \cdot \eta \quad (4)$$

$$\text{mit } \eta = \left[\frac{h_d \cdot 0,7}{4 \cdot h} \cdot \left(3 - \frac{0,49 \cdot h_d^2}{h^2} \right) + 0,008 \cdot \frac{\ell_i}{h_r} \right] \quad (5)$$

$$R_{t,90} = 0,5 \cdot \ell_{t,90} \cdot b \cdot k_{t,90} \cdot f_{t,90} \quad (6)$$

$$V_{u,calc,mean} = \frac{R_{t,90}}{\eta} \quad (7)$$

Sieht man von dem sehr hohen Versuchsergebnis des Prüfkörpers 1 mit dem Einzelloch A ab, das rd. 20% über dem rechnerischen Mittelwert liegt, so entsprechen alle anderen Versuchser-

gebnisse den Rechenwerten sehr gut. Die Abweichung beträgt max. 9%, wobei die Versuchsergebnisse durchweg auf der sicheren Seite liegen. Anzumerken ist, dass bei der Ermittlung der rechnerischen Querkraft für das umschriebene Loch (Prüfkörper Nr. 6) die volle Durchbruchshöhe, wie bei Rechteckquerschnitten üblich, angesetzt wurde.

Ungeachtet der Tatsache, dass die experimentellen Untersuchungen bedingt dadurch, dass je Konfiguration bislang nur ein Prüfkörper untersucht wurde, in statistischer Hinsicht geringe Aussagekraft haben, so untermauern sie in der Tendenz doch die in Abschnitt 3 vorgestellten rechnerischen Untersuchungen. Grob verallgemeinernd gilt hiernach auch bei unbewehrten und in den untersuchten Größe nicht zulässigen Durchbrüchen bei einem lichten Abstand von h (anstatt $1,5h$) eine Querkraft- und Momententragfähigkeit, die derjenigen eines einfach durchbrochenen Trägers entspricht. Bei weiterer Verringerung des lichten Abstandes zwischen den Löchern ergeben sich Tragfähigkeitsabminderungen in der Größenordnung bis 20%, die rechnerisch zu berücksichtigen sind. Sofern die Löcher so nahe beieinander liegen, dass sie durch ein fiktives Rechteckloch mit zulässigen Grenzmessungen umschrieben werden können, kann der Nachweis bzw. die Bewehrungsausführung für das umschriebene Rechteckloch geführt werden.

6. Zusammenfassung

Als Ergebnis der vorgestellten Untersuchungen lässt sich festhalten, dass sich der heute in DIN EN 1995-1-1/NA [2] festgelegte Mindestabstand von Durchbrüchen, zumindest für die hier untersuchten runden Durchbrüche, reduzieren lässt. Hierbei können sodann weitgehend ungeändert die bekannten Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1995-1-1/NA [2] verwendet werden. Für den Fall, dass zwei kleinere Durchbrüche so nahe beieinander liegen, dass sie durch ein in der Größe zulässiges größeres Loch umschrieben werden können, kann die Bemessung zufolge der durchgeführten Untersuchungen für ein fiktiv umschreibendes Loch, das normativ entweder bewehrt oder unbewehrt auszuführen ist, vorgenommen werden. Dieser Ansatz liegt experimentell untermauert zumindest für runde Durchbrüche mit der untersuchten Größe auf der sicheren Seite

7. Literatur

- [1] EN 1995-1-1:2010, Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung
- [2] DIN EN 1995-1-1/NA:2013, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [3] DIN 1052:2008, Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [4] Frech, P.; Kolb, H. (1974) Untersuchungen an durchbrochenen Bindern aus Brett-schichtholz. Forschungsvorhaben Schlussbericht H 30721, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart
- [5] Kolb, H.; Epple, A. (1985) Verstärkung von durchbrochenen Brettschichtholzbindern. Schlussbericht Forschungsvorhaben I.4 – 34810, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Universität Stuttgart

- [6] Höfflin, L. (2005) Runde Durchbrüche in Brettschichtholzträgern – Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Dissertation, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (Otto-Graf-Institut), Schriftenreihe Heft 90, Universität Stuttgart
- [7] Aicher, S.; Höfflin, L. (2006) Tragfähigkeit und Bemessung von Brettschichtholzträgern mit runden Durchbrüchen – sicherheitsrelevante Modifikationen der Bemessungsverfahren nach Eurocode 5 und DIN 1052. Forschungsschlussbericht DIBt – Vorhaben ZP 52-5-13.161-1092/04, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
- [8] Aicher, S.; Höfflin, L.; Reinhardt, H. (2007) Runde Durchbrüche in Biegeträgern aus Brettschichtholz-Teil 2: Tragfähigkeit und Bemessung. In: Bautechnik 84, Nr. 12, S. 867-880
- [9] EN 14080:2013, Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen; Deutsche Fassung