

Stirnseitige Verklebung von Holz als Schlüsseltechnologie für punktgestützte Flachdecken aus Brettsperrholz

Stefan Zöllig
Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG
Timber Structures 3.0 AG
Thun, Schweiz



Stirnseitige Verklebung von Holz als Schlüsseltechnologie für punktgestützte Flachdecken aus Brettsperrholz

Stefan Zöllig¹, Andrea Frangi², Steffen Franke³, Marcel Muster⁴



1. Abstract

Alle bekannten Holzbausysteme erlauben bis heute nur Geschosdecken mit einachsiger Tragwirkung. Im Vergleich zu normalen Stahlbetonplatten sind Holzplatten oft dick, teuer und kompliziert zu bauen. Der Grund dafür ist, dass es keine effiziente Verbindungstechnik gibt, um die Holzplattenelemente starr miteinander zu verbinden. Alternative Lösungen sind hybride Struktursysteme mit Beton oder Stahl, jedoch führt diese Materialkombination zu einigen Nachteilen insbesondere hinsichtlich Gewicht, Ökologie, Bauzeit und Kosten.

Im Rahmen eines großen Forschungsprojekts wurde ein neues Holzplattensystem entwickelt und bereits in ersten realen Anwendungen getestet. Das entwickelte Geschosdeckensystem ist für Wohn-, Gewerbe- und Industriebauten konzipiert. Das Decken-System arbeitet als flache Platte, die vertikale Lasten biaxial trägt und aus Holz-Plattenelementen wie CLT besteht, die vor Ort mit einer Hochleistungs-Stoßverbindungs-Technologie verklebt sind. Forschung über den Stützenkopf, die Stoßverbindung und Brandversuche wurde bereits durchgeführt. Die Forschung zeigte die Machbarkeit dieser Innovation. Im Jahr 2015 wurde in Thun/Schweiz als erster Prototyp ein Mehrfamilienhaus gebaut. Ein großes dreijähriges Forschungsprojekt 2016-2019 hat zum Ziel, Marktreife zu erreichen.

2. Einführung

Seit 2009 arbeiten die Schweizer Ingenieurfirma Timbatec, die ETH Zürich, die BFH Biel, die Purbond (Henkel-Gruppe) und Schilliger Holz an der Entwicklung einer zweiachsig tragenden Flachdecke aus Holz aus Elementen wie CLT, die vor Ort mit einer Hochleistungs-Klebefuge verklebt sind. In der Zwischenzeit wurden mehrere Bachelor- und Masterarbeiten durchgeführt. Die Ergebnisse der Forschungsprojekte sind vielversprechend: Einerseits wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit einem Stützenraster bis 8,00 x 8,00 m und einer Nutzlast von 5 kN / m² [3, 4] Holz-Flachdecken herzustellen. Dies bei vergleichbaren Kosten wie normale Stahlbetondecken, aber nur mit einem Fünftel des Gewichts und nahezu keinen CO₂-Emissionen. Im Gegenteil, eine große Menge an CO₂ wird in der Struktur gespeichert. Das Forschungsprojekt hat dazu geführt, dass ein erster Prototyp gebaut werden konnte. Darüber hinaus eröffnet die neu entwickelte Klebetechnik neue Anwendungsfelder für den Holzbau. Es lassen sich Stäbe mit nahezu beliebigen Längen oder Platten nahezu beliebiger Form und Grösse herstellen. So können z.B. biegesteife Wände, Decken oder Schalen beliebiger Form hergestellt werden. Diese Entwicklung ist so bahnbrechend, dass man von einer neuen Generation im Holzbau sprechen kann.

3. Evolution im Holzbau

3.1. TIMBER STRUCTURES GENERATION 1.0: Vollholz-Stützen und -Träger

Seit Jahrhunderten werden Baumstämme und Balken im Bau verwendet. Bäume wurden gefällt, Äste entfernt, entrindet und zu Balken gesägt, um Gebäude zu bauen.

3.2. TIMBER STRUCTURES GENERATION 2.0: Brettschichtholz und CLT

Im 20. Jahrhundert wurden die Bäume zu Brettern gesägt, getrocknet, gehobelt und zu Brettschichtholz oder Brettsperrholz verklebt. Mit diesen Produkten kann ein Träger breiter und länger als ein Baum sein. Auch gebogene Träger sind möglich. CLT Platten von bis zu 3,40 m Breite und 20 m Länge können heute industriell gefertigt werden.

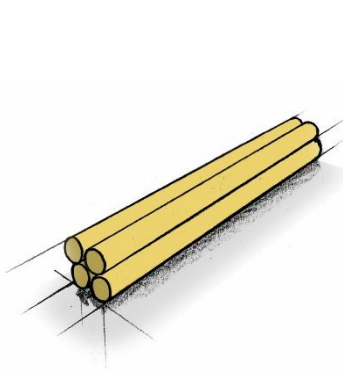


Abbildung 1: Timber Structures 1.0:
Stämme und Balken

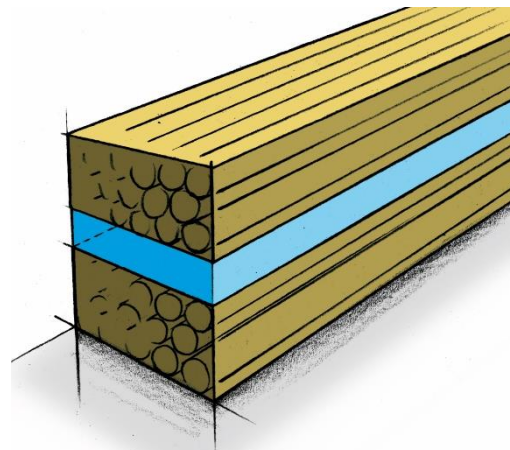


Abbildung 2: Timber Structures 2.0:
Brettschichtholz und Brettsperrholz CLT

¹ Timbatec, Stefan.Zöllig@timbatec.ch

² ETH Zurich, frangi@ibk.baug.ethz.ch

³ BFH Biel, steffen.franke@bfh.ch

⁴ ETH Zurich, marcel.muster@ibk.baug.ethz.ch

3.3. TIMBER STRUCTURES GENERATION 3.0: Stirnseitige Verklebung

Die heutige Entwicklung ermöglicht nun die Stumpfverbindung von Fasern und kann somit zu der 3. Generation in Holz führen, genannt und patentiert als Timber Structures 3.0. Für eine breite Anwendung dieser innovativen Technik sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

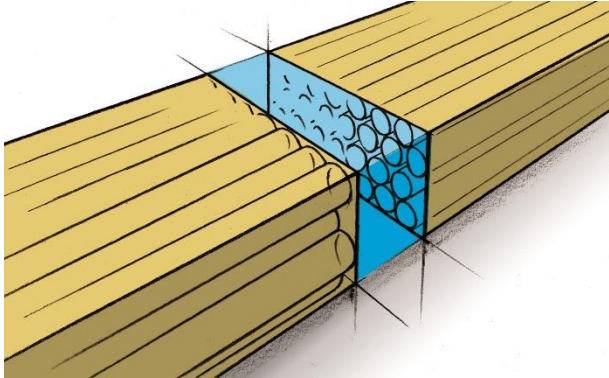


Abbildung 3: Timber Structures 3.0: Stirnseitige Verklebung

4. Aktuelle Forschung

4.1. Gebäudestruktur

Ziel der neu entwickelten Technologie ist die Realisierung von typischen Skelettbauten mit Holz nach Bild 4, die nur aus verklebten Holzelementen bestehen, ohne Befestigungselemente wie Schrauben, Nägel oder Metallplatten zu verwenden. Die wichtigsten Gebäudeteile sind Wände der Treppenhäuser für die horizontale Lastabtragung, Stützen und Flachdecken für die vertikale Lastabtragung. Die größte Herausforderung ist die Entwicklung einer flächig tragenden Holzplatte.

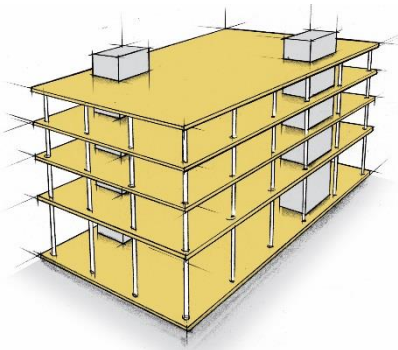


Abbildung 4: Typische Skelettstruktur

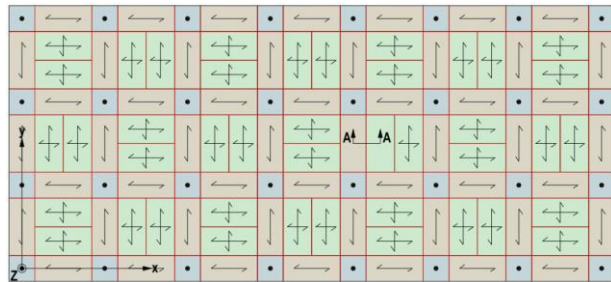


Abbildung 5: Grundriss

Aufgrund der Beschränkungen der Vorfertigung, der Transport- und Montageprozesse ist es unerlässlich, jede Art von Grundriss effizient in Plattenelemente aufzuteilen. In einer parametrischen Studie hat sich der unten gezeigte typische Grundriss als am besten geeignet erwiesen. Die grünen Elemente sollten die Last zweiachsig auf die einachsigen, tragenden roten Elemente übertragen, die die Last auf die um die Säulen blau markierten zentralen Elemente übertragen. Die blauen Elemente ähneln Stahlbetonplatten mit Durchstanzbewehrung, die hohen Biegemomenten und Scherkräften ausgesetzt sind.

4.2. Stützenkopf-Elemente

Eine grundlegende statische Herausforderung ist die hoch beanspruchte Fläche im Stützenbereich sowie deren Verstärkung gegen das Durchstanzen der Stütze. Boccadoro machte eine theoretische Analyse und testete anschliessend 6 verschiedene Schichtaufbauten im Maßstab 1:1 [1]. Hauptmaterial für die zentralen Plattenelemente war Furnierspertholz aus Buche, das im Vergleich zu gewöhnlichem Nadelholz sehr gute mechanische

Eigenschaften aufweist. Sechs Stützenkopf-Elemente wurden an der ETH Zürich auf Durchstanzen getestet: Drei homogene Massivplatten aus Buchensperrholz und drei Hybridplatten aus Buchensperrholz und normalen Fichtenplatten. Die Plattendicke betrug 240 mm, 320 mm und 400 mm. Eine Grundstudie zeigte den Vorteil des Buchensperrholzwerkstoffes in Form von Biege- und Scherfestigkeiten. Die erwartete Tragfähigkeit der zentralen Plattenelemente wurde zuerst mit einfachen statischen Modellen und später mit einem FE-Programm abgeschätzt. Dann wurden an der ETH Zürich sechs zentrale Plattenelemente von 2,5 x 2,5 x 0,24, 0,32 und 0,40 m geprüft. Die Plattenelemente wurden durch einen zentral angeordneten Zylinder belastet, um die Wirkung der Krafteintragung von der Decke in die Stütze zu simulieren. Die Proben versagten bei Kräften zwischen 1'150-3'100 kN. Diese Werte sind sehr hoch und zeigen das große Potential der mechanischen Eigenschaften der Stützenkopfelemente aus Buchen-Furniersperrholz.

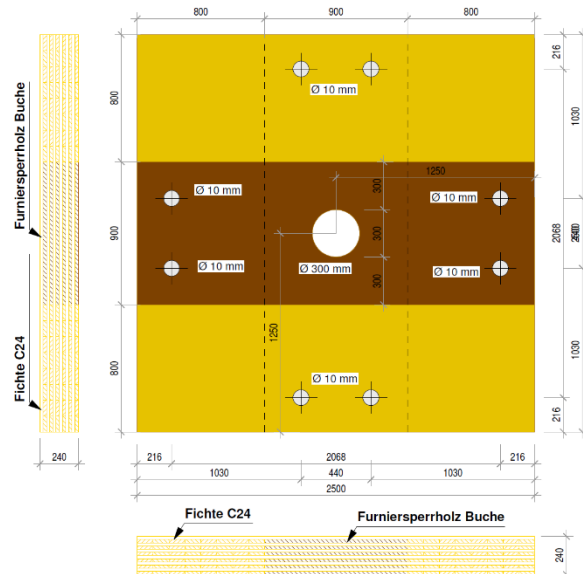
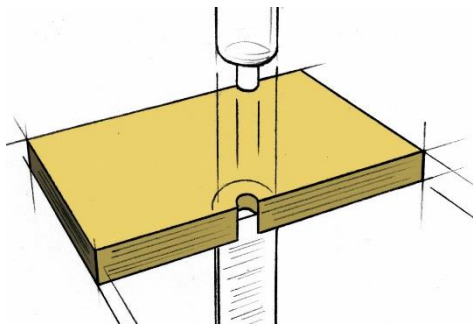


Abbildung 6: Stützenkopf-Element mit Stütze

Abbildung 7: Durchstanzenversuch ETH Zürich

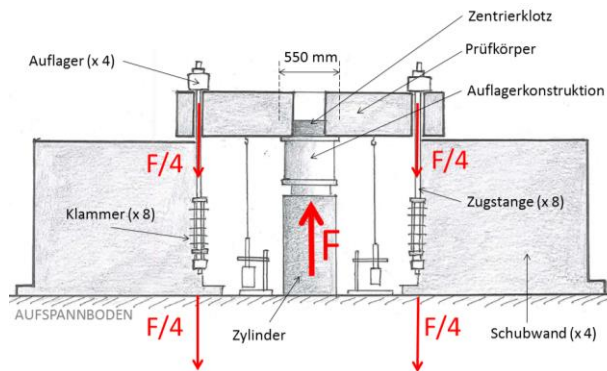


Abbildung 8: Prüfaufbau eines Stützenkopf-Elementes

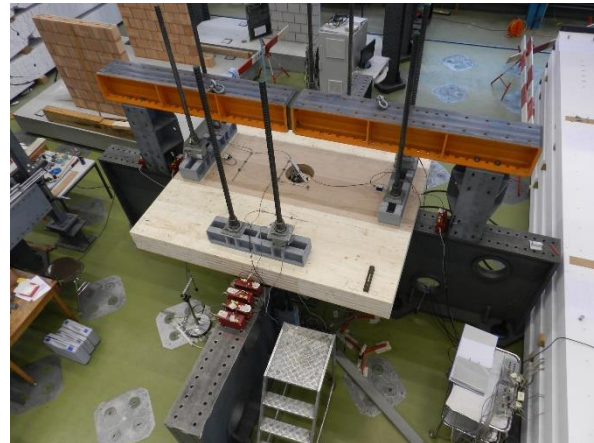


Abbildung 9: Prüfung an der ETH Zürich

Tabelle 1: Resultate der Durchstanzprüfungen

Slab	Load carrying capacity			Effective Force	Load bearing safety
	Test results	Characteristic value	Design value SIA 265	Design value SIA 260	
	$F_R = F_{cr}$	F_{Rk}	F_{Rd} ($\gamma_M/\eta_M=1.5$, $\eta_w=\eta_t=1$)	F_{Ed}	$F_{Rd} \geq F_{Ed}$
Name	kN	kN	kN	kN	
K240	1'362	800	533	690	Not ok
F240	1'155	1'026	684	690	Not ok
K320	1'700	1'515	1'010	700	Ok
F320	2'100	1'951	1'300	700	Ok
K400	2'500	2'328	1'552	710	Ok
F400	3'099	2'878	2'066	710	Ok

K = beech plywood and spruce boards combined

F = beech plywood

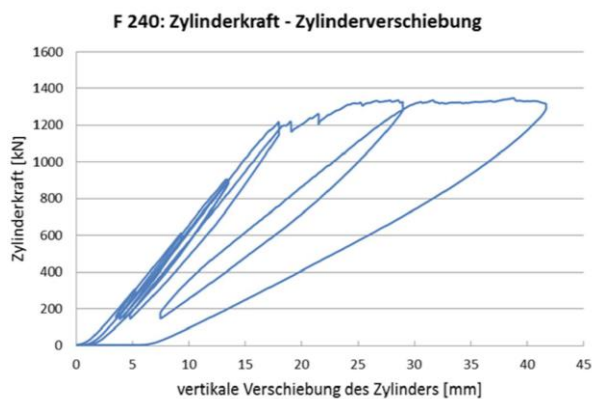


Abbildung 10: Duktiles Verhalten des Stützenkopf-Elementes F240

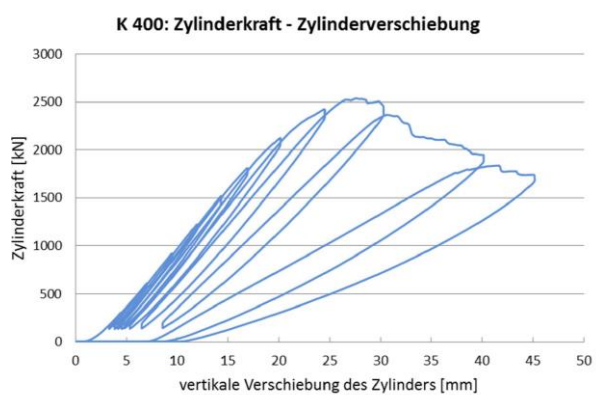


Abbildung 11: Duktiles Verhalten des Stützenkopf-Elementes K400

Der entscheidende Teil der Auswertung war die Analyse des beobachteten sehr duktilen Verhaltens der Buchensper Holz-Plattenelemente, was bei der Holzkonstruktion eher außergewöhnlich ist, da sich Holz in der Regel spröde verhält. Dieses duktile Verhalten lässt sich mit der Hypothese der Spannungsumverteilung in der Breite und teilweise in der Höhe des Querschnitts erklären. Während die Risse nach außen wachsen, wird der zentrale Bereich der Platte progressiv entlastet und die Biegebeanspruchungen werden auf den äußeren Bereich des Elements übertragen. Bei den homogenen Exemplaren ist das Plateau der maximalen Kraft im Vergleich zu dem in den Hybridproben deutlicher [1,5].

4.3. Stirnseitige Verklebung von Holz

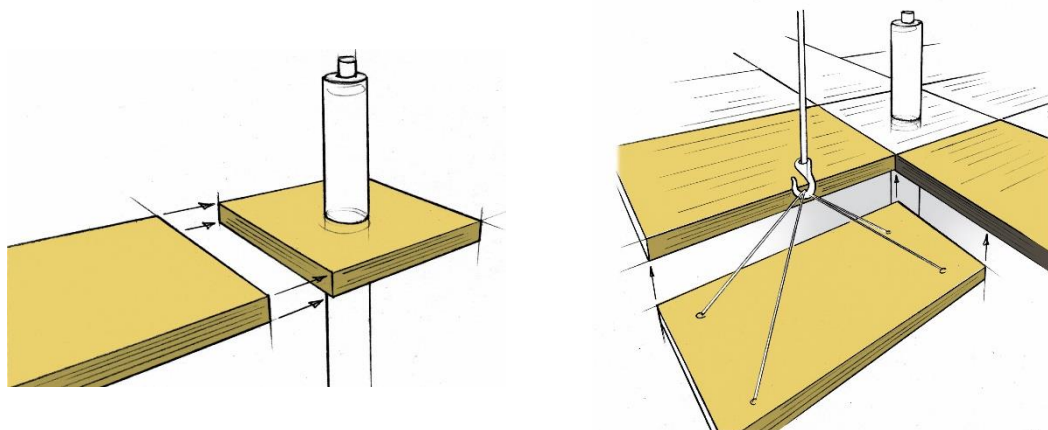


Abbildung 12: Wie die Decken-Elemente miteinander verbinden?

Um die Deckenelemente miteinander zu verbinden, wurden verschiedene Methoden geprüft. Eine geometrische Formgebung wie eine Ausfällung oder eine Nut und Feder würde zu einer teuren Bearbeitungszeit und einem massiven Materialverbrauch durch die doppelte Plattenfläche im Anschlussbereich führen. Aufgrund der Querspannungen an der Ausfällung müssten die Platten mit Querspannungsverstärkungen versehen werden. Keilzinken sind anfällig für Beschädigungen und übertragen niedrige Zugspannungen senkrecht zur Faser, wenn sie nicht sorgfältig angeordnet sind. Daher wurde eine stirnseitige Verklebungstechnologie in Betracht gezogen. Bisher gibt es auf dem Markt keine zugelassenen Klebstoffe für stirnseitig verklebte Stoßfugen. Die Purbond AG, Teil der Henkel-Gruppe, hat einen 2-Komponenten-Polyurethan-Klebstoff entwickelt, der für die gewünschten Zwecke eingesetzt werden kann.

In einem ersten Schritt wurden verschiedene Geometrien von Klebeverbindungen untersucht. Die einfachste Geometrie, die produziert werden sollte, war die stumpfe Fuge. Aber auch verschiedene Profile wie Keilnuten und Keilzinken wurden untersucht [6].

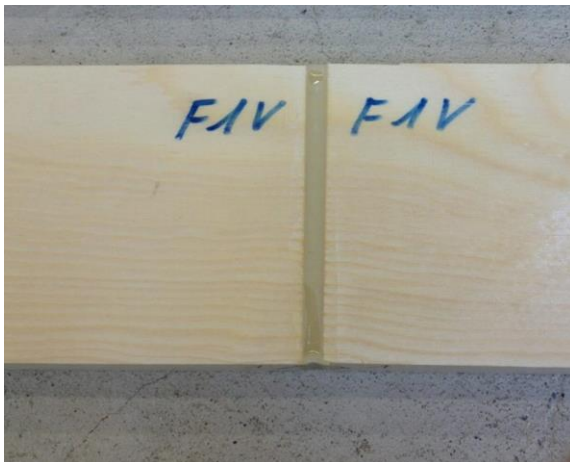


Abbildung 13: Stumpf verklebter Stoss [6]



Abbildung 14: Stumpf verklebter Stoss in der Zugprüfanlage [6]

In verschiedenen Versuchen wurde untersucht, welche Dicke der Fugen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Umstände wie unterschiedlicher Temperaturen oder Fugenbreiten gefüllt werden konnten. Über 1'000 Zugversuche an Lamellen in 17 Serien wurden durchgeführt [6,7,8,9,10,11,12]. Der Abfüllvorgang von unten ist sehr wichtig, so dass sich jede Luftblase nach oben bewegt und keine Lufttaschen entstehen. Aus diesen Tests wurden wichtige Voraussetzungen für die Qualitätssicherung geschaffen. Füllemann [7] untersuchte weitere Einflüsse auf der Baustelle:

Minimale Fugenstärke, Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt, Verschmutzung mit Öl oder Staub, Bewegung und Vibrationen und verschiedene Arten der Vorbehandlung der zu verbindenden stirnseitigen Flächen.

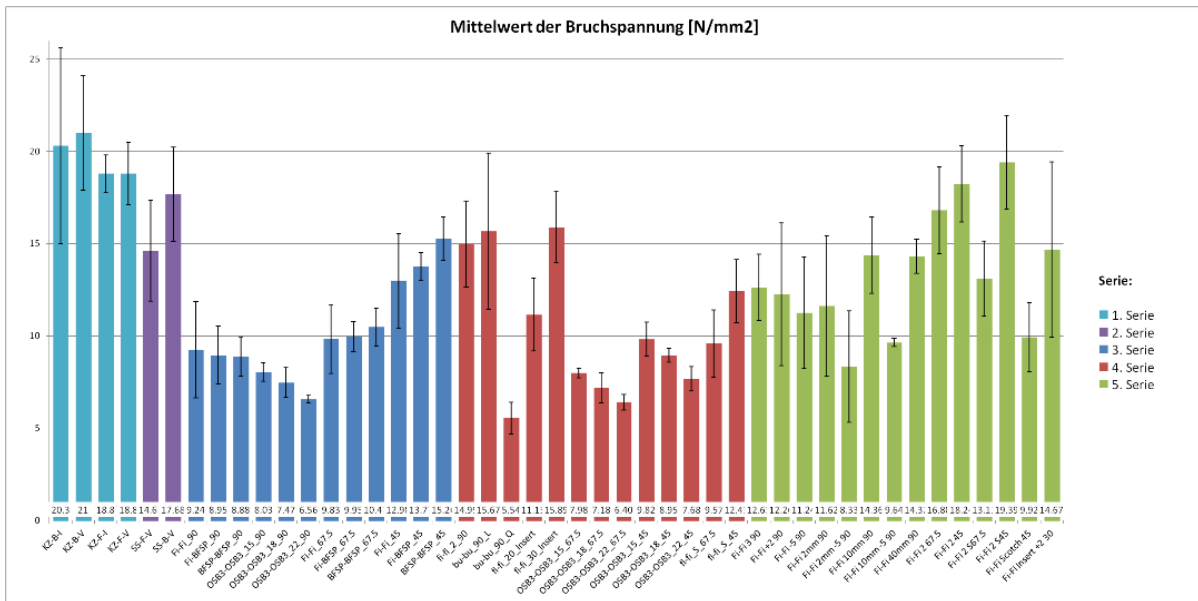


Abbildung 15: Resultate der Zugprüfungen (Mittelwert der Bruchspannung)

Lehmann [12] führte sieben Versuchsreihen mit insgesamt über 250 Probekörpern durch und bestimmte schliesslich statistisch zuverlässige Festigkeitswerte für die Zug- und Biegefestigkeit einer stumpfen Fuge von CLT-Platten. Die Tests erlaubten ein besseres Verständnis des Einflusses von Feuchtigkeitsveränderungen und der Auswirkungen von Langzeitbelastungen auf die Biegefestigkeit der stirnseitigen Verbindung. Die Biegefestigkeit wurde in Vierpunkt-Biegeversuchen mit unterschiedlichen Variationen der Geometrie, Holzfeuchte und Belastungsdauer bestimmt.

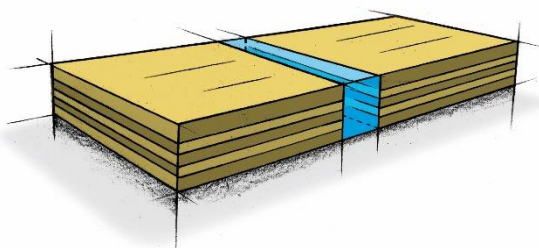


Abbildung 16: Stirnseitige Verklebung von CLT-Platten

Die Ergebnisse der Studien zeigten eine gleichbleibend gute Qualität der stirnseitigen Klebeverbindung. Durch diesen Fortschritt wurden charakteristische Biegefestigkeiten von 15,6 N / mm² bis 20,7 N / mm² erreicht. Diese Werte sind höher als alle bisher erreichten Festigkeitswerte.

Die Untersuchungen über den Einfluss von Feuchtigkeit zeigten, dass ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt des Holzes zu einer Verringerung der Biegefestigkeit führte. Darüber hinaus wurde erkannt, dass der Feuchtigkeitsgehalt von der Faserrichtung abhängt und die Positionierung der Platten im Probekörper und der Feuchtigkeitsfluss in das Holz vor allem in den Seitenzonen problematisch ist. In den Studien über die Auswirkungen einer Langzeitbelastung wurde keine signifikante Veränderung der Festigkeit beobachtet.

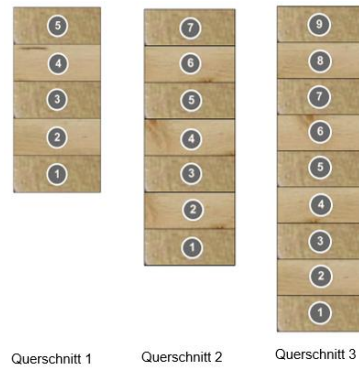


Abbildung 17: CLT Querschnitte 50 x 100 / 140 / 180 mm für Biegeprüfungen

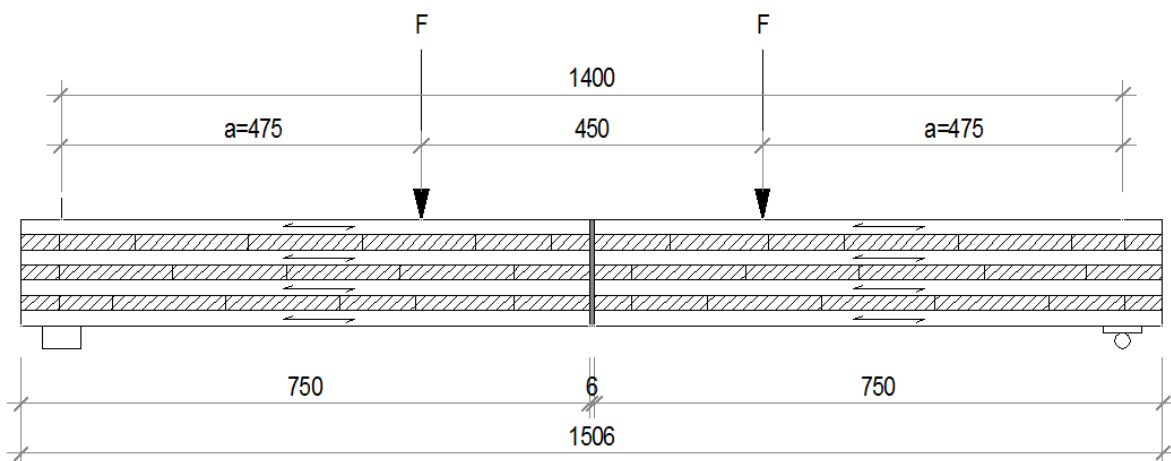


Abbildung 18: Vierpunkt-Biegeversuche an CLT-Trägern mit verklebter Stoßfuge in der Mitte



Abbildung 19: Langzeit-Biegeversuche an CLT-Trägern mit verklebter Stoßfuge in der Mitte



Abbildung 20: Prüfanordnung für Biegeprüfungen an CLT-Trägern

Tabelle 2: Resultate der Biegeprüfungen an CLT-Trägern

Übersicht Ergebnisse	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Referenzserie
Schaumbildung [1-3]	0.7	0.56	0.7	0.9	0.5	0.63	0.94	1
Anteil Fügeteilbruch [%]	2.34	2.13	2.27	4.13	0.53	0.53	2.77	0.20
Anteil Kohäsionsbruch [%]	16.48	19.02	18.80	18.59	17.86	15.97	17.10	4.60
Anteil Adhäsionsbruch [%]	81.17	78.86	78.93	77.28	81.55	84.53	80.10	95.20
Mittelwert Bruchspannung [N/mm ²]	25.69	22.2	24.69	21.10	20.22	19.92	21.26	16.60
Standardabweichung [N/mm ²]	3.67	3.09	3.43	2.5	2.0	2.57	2.92	5.20
Variationskoeffizient: [N/mm ²]	14.3	13.9	13.89	11.89	16.68	12.89	13.75	31.25
charakteristischer Wert m_k [N/mm ²]	20.77	17.00	18.52	16.62	16.68	15.65	16.35	12.16
Designwert m_d [N/mm ²]:	9.10	7.94	8.64	7.74	7.79	7.31	7.63	5.67

4.4. Brandprüfungen

In der Masterarbeit von Bühlmann [2] wurden klein- und großflächige Brandversuche an stirnseitig stumpf verklebten Sperrholz- und CLT-Platten durchgeführt (siehe auch [13]). Sechs kleine Brandversuche wurden mit jeweils vier unterschiedlich verklebten Stoßfugen durchgeführt. Die Exemplare aus Buchensperrholz und Fichte-CLT hatten die Abmessungen von 1,2m x 0,9m und hatten jeweils zwei 6 mm und 12 mm breite Fugen. Die Probekörper wurden der ISO-Norm-Brandkurve für 30, 60 und 90 Minuten auf der einen Seite ausgesetzt. Mit Thermoelementen wurden Temperaturen in den Fugen aufgezeichnet. Nach dem Brandtest wurde die Kohlen-Schicht entfernt und die Abbrandtiefe bestimmt. So können folgende wesentliche Schlussfolgerungen zum Brandverhalten der verklebten Stoßfugen gemacht werden:

- Das Brandverhalten der Stoßfugen gleicht dem Brandverhalten von Holz.
- Die Tiefe der Verkohlung in den Fugen ist gleich oder kleiner als für den Restquerschnitt der Prüfkörper aus Fichte CLT oder Buchensperrholz. Der Einfluss des Stumpfstoßes erhöht sich mit der Dauer des Brandes und der Fugenstärke.
- Für die verschiedenen Fugenstärken und -proben konnten die Abbrandraten wie folgt bestimmt werden:

Tabelle 3: Ergebnisse der Kleinbrandversuche an Prüfkörpern aus Fichte CLT und Buchensperrholz

Fichte BSP	6mm Fuge	$\beta_0 = 0.59 \text{ mm/min}$
		$\beta_{\text{Schicht2}} = 0.77 \text{ mm/min}$
Fichte BSP	12mm Fuge	$\beta_0 = 0.52 \text{ mm/min}$
		$\beta_{\text{Schicht2}} = 0.53 \text{ mm/min}$
Buche FU	6mm Fuge	$\beta_0 = 0.66 \text{ mm/min}$
		$\beta_{\text{Schicht2}} = 1.07 \text{ mm/min}$
Buche FU	12mm Fuge	$\beta_0 = 0.66 \text{ mm/min}$
		$\beta_{\text{Schicht2}} = 0.78 \text{ mm/min}$



Abbildung 21: Kleinbrandversuche an Prüfkörpern aus Fichte CLT und Buchensperrholz nach dem Entfernen der Kohleschicht

Um das Gesamtverhalten des Geschosdeckensystems zu verifizieren, wurde auf dem horizontalen Ofen bei der EMPA in Dübendorf ein großflächiger Brandtest mit einer belasteten asymmetrischen CLT-Platte durchgeführt. Die CLT-Platte hatte die Abmessungen von 5,35 x 2,85 x 0,2 m und wurde aus vier CLT-Elementen mit drei verklebten Stoßfugen hergestellt.



Abbildung 22: Verklebung der CLT-Elemente für die Grossbrandprüfung

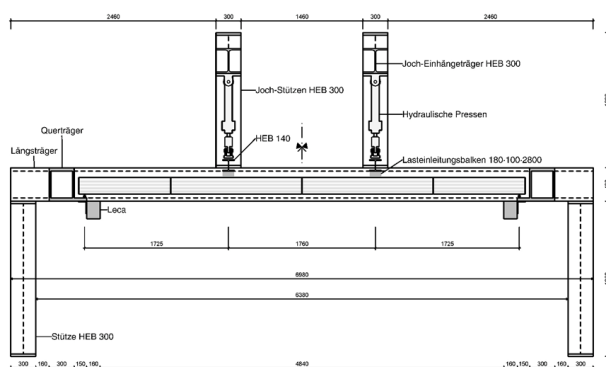


Abbildung 23: Prüfanordnung für den Grossbrandversuch (Längsschnitt)

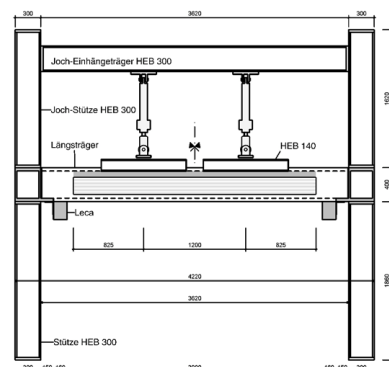


Abbildung 24: Prüfanordnung für den Grossbrandversuch (Querschnitt)

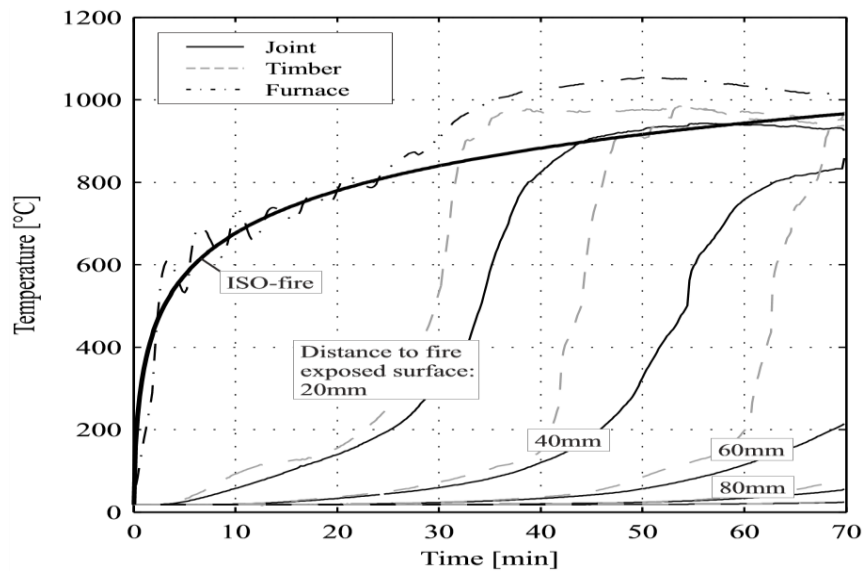


Abbildung 25: Temperaturentwicklung in der CLT-Platte an verschiedenen Stellen während der großflächigen Brandprüfung

Die Probe wurde als einfacher Träger ausgebildet und während der Brandprüfung mit einer konstanten Belastung von 4 x 8 kN in den Drittelpunkten belastet. Das Lastniveau für die Bemessung im Brandfall wurde nach den Schweizer Normen SIA 260 und SIA 261 für ein Bürogebäude unter Berücksichtigung einer Spannweite von 8 m und einer biaxialen Wirkung der CLT-Platte berechnet. Die Temperatur wurde mit Thermoelementen auf der Oberfläche aufgezeichnet, zwischen den Schichten der CLT-Platten und in der Stoßfuge. Zusätzlich wurden die vertikale Verformung und die Belastung gemessen.

Die wichtigsten Ergebnisse der großflächigen Brandversuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die CLT-Platte mit verklebten Stoßfugen erreichte einen Feuerwiderstand von 69 Minuten.
- Die CLT-Platte versagte an einem spröden Versagen der verklebten Stoßfuge.

5. Proof of concept

Im Jahr 2015 wurde ein Mehrfamilienhaus mit TS3 Technologien in Thun, Schweiz, gebaut.



Abbildung 26: Baustelle eines mehrgeschossigen Wohnhauses in Thun, Schweiz



Abbildung 27: Timber Structures 3.0 Geschossdecke

6. Weiterführende Forschung

Für die Weiterentwicklung wurden zwei KTI-Forschungsprojekte von insgesamt CHF 1,7 Mio genehmigt. Sie werden von 2016 bis 2019 durchgeführt.

7. Schlussfolgerung

Die Timber Structures 3.0-Technologien markieren den Einstieg in eine völlig neue Denkweise und Gestaltung von Holzbauten. Sie eröffnen ein breites Feld neuer Anwendungen in Forschung, Technologien und Märkten.

8. Forschungspartner

Forschungspartner: Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG und Timber Structures 3.0 AG (Stefan Zöllig), Berner Fachhochschule BFH Biel (Steffen Franke, Andreas Müller), ETH Zurich (Andrea Frangi), Purbond AG / Henkel Cie AG (Christian Lehringer), Schilliger Holz AG (Ernest Schilliger und Werner Leibundgut).

9. Literatur

- [1] Boccadoro L.: Experimentelle Untersuchungen zum Durchstanzen von Holzdecken. Master Thesis, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2012.
- [2] Bühlmann A.: Brandverhalten von stirnseitig verklebten Brettsper Holzplatten. Master Thesis, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2014.
- [3] Zöllig S.: Geschossdecken für Gewerbe und Industrie, Machbarkeitsstudie – Schlussbericht BAFU Aktionsplan Holz 2009. Timbatec AG, Thun, 2009.
- [4] Zöllig S.: Geschossdecken für Gewerbe und Industrie – Schlussbericht BAFU Aktionsplan Holz 2012. Timbatec AG, Thun, 2012.
- [5] Grüter B.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Holzplatten aus Buche. Master Thesis, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2013.
- [6] Schawalder A.: Untersuchungen zu baustellentauglichen Verbindungen mittels Hirnholzverklebungen im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2013.
- [7] Füllemann, U.: Untersuchungen ausgewählter Parameter von stirnseitigen Holzverklebungen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.
- [8] Geck, M., & Passerini, S.: Erarbeitung eines Delaminierungsprüfverfahrens für stumpfe, stirnseitige Kebstoffverbindungen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.
- [9] Koelman, T.: Untersuchungen zu stirnseitig verklebten Bauteilen mit Biegebeanspruchung im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.
- [10] Kunz, F.: Untersuchungen zur stirnseitigen Verklebung von Holzbauteilen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2015.
- [11] Angehrn, D.: Tragverhalten von stirnseitig verklebten Brettsper Holzplatten. Master Thesis, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2015.
- [12] Lehmann, T.: Ermitteln von Bemessungswerten für tragende stirnseitige Verklebung mit Biegebeanspruchung im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2015.
- [13] Klingsch E., Klippel M., Boccadoro L., Frangi A., Fire tests on cross-laminated timber slabs and concrete-timber composite slabs, Test report, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, 2016.