Einfluss des Klebstoffes auf das Brandverhalten von Holzbauteilen

Influence of adhesive on the fire behaviour of timber members

L'importance du choix de colle dans le comportement au feu d'éléments constructifs bois

Michael Klippel
Institut für Baustatik und Konstruktion,
ETH Zürich
Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Andrea Frangi
Institut für Baustatik und Konstruktion,
ETH Zürich
Zürich, Schweiz

Einfluss des Klebstoffes auf das Brandverhalten von Holzbauteilen

1. Einführung

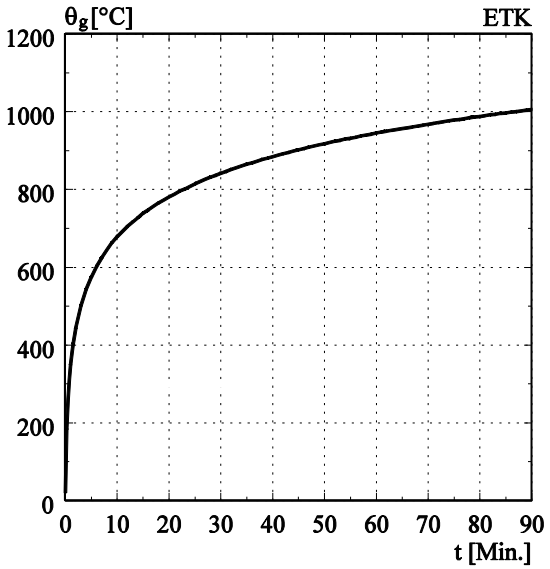
Die Verwendung von Klebstoffen für die Herstellung von Holzprodukten ist sowohl in der Holzwerkstoffindustrie als auch im konstruktiven Holzbau unerlässlich. Klebstoffe werden vor allem für die Herstellung von Plattenwerkstoffen und verklebten tragenden Bauteilen wie Brettschichtholz oder Brettsperrholz eingesetzt. Die Tragsicherheit von verklebten tragenden Holzbauteilen wird durch das Verhalten der eingesetzten Klebstoffe maßgeblich beeinflusst. Klebstoffe müssen eine zuverlässige Festigkeit und Dauerhaftigkeit aufweisen, so dass sie unter der vorgesehenen Nutzung und während der ganzen geplanten Nutzungsdauer ihre Funktionsfähigkeit vollständig behalten. Diese Leistungsanforderung muss auch im Brandfall sichergestellt sein.
Verklebte tragende Holzbauteile sind so zu bemessen, dass diese die gestellten Anforderungen während der geforderten Feuerwiderstandsdauer erfüllen. Die nachfolgend dargestellten numerischen und experimentellen Untersuchungen wurden durchgeführt, um den Einfluss des Klebstoffes auf das Tragverhalten von Holzbauteilen zu untersuchen. Sie dienen als Grundlage zur Ableitung eines experimentell abgesicherten Berechnungsmodells für die Bemessung von verklebten tragenden Holzbauteilen im Brandfall unter Berücksichtigung des Einflusses des Klebstoffes.

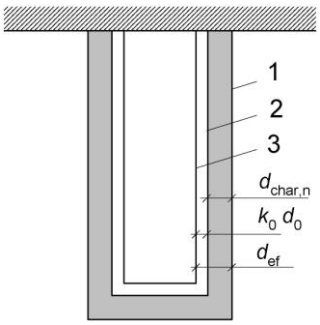
2. Brandverhalten von Holz

Wird dem Holz genügend Wärme zugeführt, beginnt es, sich in einem thermischen Prozess (Pyrolyse) unter Bildung von Holzkohle und brennbaren Gasen zu zersetzen, wodurch das Holz an Steifigkeit und Festigkeit verliert. Die Kohleschicht besitzt im Vergleich zum Holz eine geringere Wärmeleitfähigkeit und schützt daher das innere Holz vor der Wärmeeinwirkung.

Die Bemessung von Holzbauteilen im Brandfall erfolgt in der Regel über die Bestimmung des Abbrandes, wobei für ungeschützte Holzbauteile vereinfacht die Abbrandrate als konstant über die Zeit angenommen wird. Als Abbrandrate (im Folgenden mit β bezeichnet) wird der zeitliche Verlauf der thermischen Zersetzung von Holz bezeichnet und ist als Verkohlungstiefe bezogen auf die Branddauer in mm/Min. definiert. Als Abbrandgrenze kann die Lage der 300°C-Isotherme angenommen werden [5].

Die Abbrandrate für den eindimensionalen Abbrand β_0 von Nadelholz bei ISO-Normbrandbeanspruchung kann gemäß EN 1995-1-2 [5] zu β_0 = 0.65 mm/Min. angenommen werden. Die ISO-Normbrandbeanspruchung [9] kann Abbildung 1, links entnommen werden. Zur Berücksichtigung der Effekte der Eckausrundungen und von Rissen definieren die meisten Normen Abbrandraten, die größer sind als diejenige für den eindimensionalen Abbrand. Die Abbrandrate für Brettschichtholz, die diese Auswirkungen berücksichtigt, wird gemäß EN 1995-1-2 als ideelle Abbrandrate β_n (notional charring rate) bezeichnet und kann zu β_n = 0.7 mm/Min. angenommen werden.





Legende:
1 Anfängliche Oberfläche des Bauteils
2 Grenze des verbleibenden Restquerschnittes
3 Grenze des ideellen Restquerschnittes

Abbildung 1: ISO-Normbrandbeanspruchung [9] (links); Definition des verbleibenden und ideellen Restquerschnittes gemäss EN 1995-1-2 [5].

Die Brandeinwirkung führt nicht nur zu einem Querschnittsverlust (Bildung von Holzkohle), sondern auch zu einer temperaturbedingten Abnahme der Festigkeit und Steifigkeit des unter der Kohleschicht vorhandenen Holzes. Bei der Methode mit reduziertem Querschnitt (Reduced cross-section method) gemäß EN 1995-1-2 wird die Abnahme der Festigkeit und Steifigkeit des vorhandenen Holzes durch Reduzierung des verbleibenden Restquerschnittes um eine bestimmte Größe berücksichtigt. Der daraus resultierende Querschnitt wird als ideeller Restquerschnitt bezeichnet (Abbildung 1, rechts). Es wird angenommen, dass das Material nahe der Abbrandgrenze mit der Schichtdicke $k_0 \cdot d_0$ keine Festigkeit und Steifigkeit aufweist, während die mechanischen Holzeigenschaften des ideellen Querschnittes denjenigen des Ausgangsquerschnittes bei Normaltemperatur entsprechen. Der Tragwiderstand im Brandfall kann folglich mit den Festigkeits- und Steifigkeitswerten bei Normaltemperatur ermittelt werden ($k_{mod,fi}$ = 1.0). Der Wert $k_0 \cdot d_0$ wird für eine Brandeinwirkungsdauer zwischen 20 und 60 Minuten konstant mit 7 mm angenommen. Die Anwendung der Methode mit reduziertem Querschnitt wird empfohlen [17].

In EN 1995-1-2 wird erwähnt, dass „durch Klebstoffe für bauliche Zwecke Verbindungen herstellbar sein müssen, die eine ausreichende Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Klebfuge während der maßgebenden Feuerwiderstandsdauer gewährleisten". EN 1995-1-2 gibt jedoch keine weiteren konkreten Angaben. Klebstoffe, die zur Gruppe der Phenole und Aminoplaste gehören, müssen die Anforderungen nach EN 301 [6] erfüllen. 1-Komponenten-Polyurethan-Klebstoffe (1-K-PUR) werden nach EN 15425 [7] geprüft. Im Bezug auf die Festigkeitsentwicklung bei hohen Temperaturen werden die geklebten Prüfkörper bei maximal 90°C über zwei Wochen konstant belastet. Zur Beurteilung des Einflusses des Klebstoffes auf das Brandverhalten von verklebten tragenden Holzbauteilen liegt jedoch keine Prüfmethode bzw. Klassifizierung vor.

In Nordamerika wurde mit dem Standard ASTM D7247 [1] im Jahre 2007 eine Prüfnorm eingeführt, bei dem Klebstoffe bei Temperaturen von maximal 232°C (450°F) mit Hilfe einer Scherprüfung getestet werden. Die Prüfkörper werden dabei vor dem Aufbringen der Belastung in einem Ofen auf die gewünschte Temperatur aufgewärmt. Bei der Entwicklung dieses Standards hielt man es für wichtig, den Klebstoff kurz vor der Entzündungstemperatur von Holz zu prüfen. Zudem gibt es nur ein „bestanden nicht-bestanden Kriterium". Der Klebstoff besteht diese Prüfung, wenn das Verhältnis der mittleren Schubfestigkeit bei Temperaturen von maximal 232°C zur mittleren Schubfestigkeit bei Normaltemperatur bei den geklebten Prüfkörpern grösser als 95% des unteren Konfidenzintervalls der mittleren Schubfestigkeit von Vollholzprobekörper ist.

Zurzeit wird durch die Arbeitsgruppe CEN TC 193/SC1/WG13 eine europäische Prüfmethode zur Beurteilung des Einflusses des Klebstoffes auf das Brandverhalten von verklebten tragenden Holzbauteilen erarbeitet. Dabei sollten die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

- Aufgrund des steilen Temperaturgradienten werden im Brandfall im Innern des verbleibenden tragfähigen Restquerschnittes keine hohen Temperaturen erreicht. Die Prüfung der Klebstoffe bei hohen Temperaturen gemäß ASTM D7247 ist somit fraglich; der Klebstoff muss bei wesentlich tieferen Temperaturen eine ausreichende Festigkeit aufweisen.
- Eine materialbasierte Beurteilung von Klebstoffen ist diskussionswürdig. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass z.B. das thermische Verhalten von 1-K-PUR Klebstoffen von der chemischen Zusammensetzung abhängt [2]. Versuchsergebnisse, die für einen speziellen PUR-Klebstoff ermittelt wurden, sind nicht auf andere PUR-Klebstoffe übertragbar. Aus diesem Grund sollte eine leistungsbasierte Beurteilung der Klebstoffe (performance-based) vorgenommen werden.
- Durch die Prüfung bei konstanten stationären hohen Temperaturen sollte es möglich sein, auf die thermische Beständigkeit und Tragfähigkeit des Klebstoffes im Brandfall zu schließen. Aus diesem Grund sollten die an Kleinversuchen bei konstanten hohen Temperaturen ermittelten Ergebnisse in Verbindung mit Brandversuchen ausgewertet werden.

Aus diesen Überlegungen wurden am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss des Klebstoffes auf das Tragverhalten im Brandfall von verklebten tragenden Holzbauteilen durchgeführt. Der Einfluss der Klebstoffe in der flächigen Verklebung (zwischen den Brettlamellen) sowie in der Keilzinkung (Längsverbindung) auf das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern im Brandfall wird im Folgenden numerisch (für die flächige Verklebung) sowie experimentell (für die Keilzinkung) anhand von instationären Brandversuchen nach ISO 834 erläutert. Anschließend wird auf das Brandverhalten von Brettsperrholzplatten eingegangen.

3. Brandverhalten von Brettschichtholz

3.1. Flächige Verklebung zwischen den Brettlamellen

Der Einfluss des Klebstoffes auf den Feuerwiderstand von Brettschichtholzlamellen wurde mit Hilfe eines sequentiell gekoppelten thermisch-mechanischen Berechnungsmodells untersucht. Die thermische Analyse wurde dabei anhand eines zwei-dimensionalen Modells mit dem finiten Elemente Programm Abaqus [3] durchgeführt. Den numerischen Untersuchungen wurde die ISO-Normbrand-beanspruchung zugrunde gelegt (vgl. Abbildung 1, links). Die Temperaturentwicklung und –verteilung innerhalb des Querschnittes wurde als Inputparameter für die mechanische Analyse verwendet. Die temperaturabhängige Modellierung von Rohdichte, Wärmeleitzahl und spezifischer Wärmekapazität für Holz und Holzkohle erfolgte gemäß EN 1995-1-2. Die Materialeigenschaften von Holz und Holzkohle wurden mit einer Serie von Brandversuchen [19] an Probekörpern aus Fichte verifiziert, die einseitig einem ISO-Normbrand ausgesetzt wurden. Die Temperaturen wurden in Holztiefen von 6, 18, 30, 42 und 56 mm von der feuerzugewandten Seite gemessen. Abbildung 2 zeigt den Vergleich der Brandversuche mit den Ergebnissen der thermischen finiten Elemente Simulationen. Experimentelle und numerische Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung.

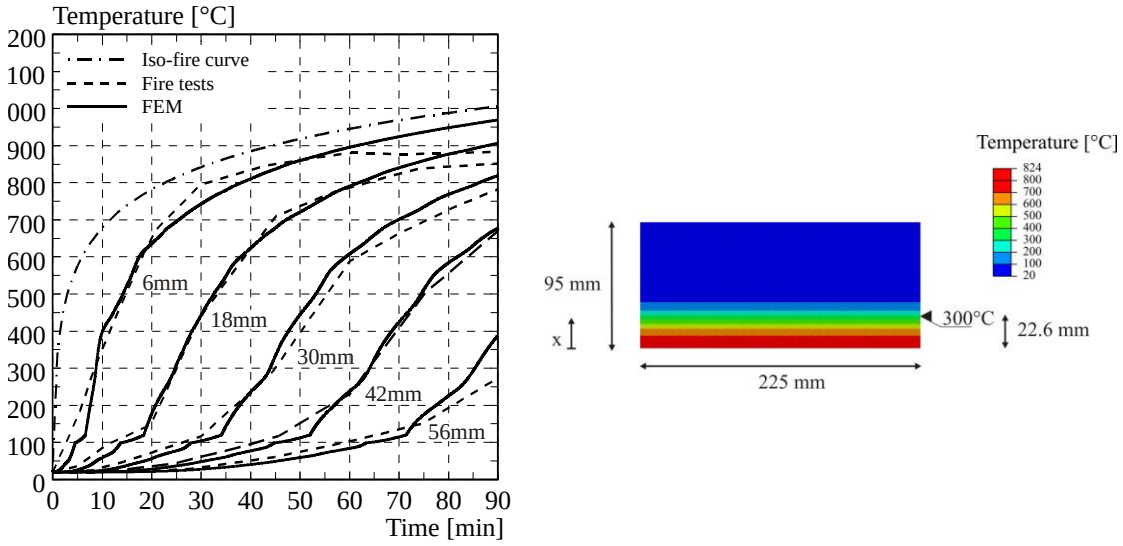


Abbildung 2: Vergleich der gemessenen [19] und berechneten Temperaturen für verschiedene Holztiefen (links); Temperaturfeld im Holzquerschnitt (225 x 95 mm) nach einer Brandeinwirkung von 30 Minuten (rechts)

Für die mechanische Analyse wurde ein auf Visual Basic (VBA) basiertes Makro eingebettet in Excel mit dem Namen CSTFire [23] verwendet. Die mit Hilfe der thermischen Analyse berechnete Temperaturverteilung im Querschnitt zusammen mit der relativen Festigkeits- und Steifigkeitsabnahme gemäß EN 1995-1-2 für eine Druck- und Zugbeanspruchung wurden als Inputparameter verwendet. Die Abnahme von Druckfestigkeit f_c, Zugfestigkeit f_t sowie von Elastizitätsmodul für eine Druckbeanspruchung E_c und Zugbeanspruchung E_t ist als bi-lineare Funktionen der Temperatur zwischen 20 und 300°C mit einem Knickpunkt bei 100°C gegeben (vgl. Abbildung 3, links).

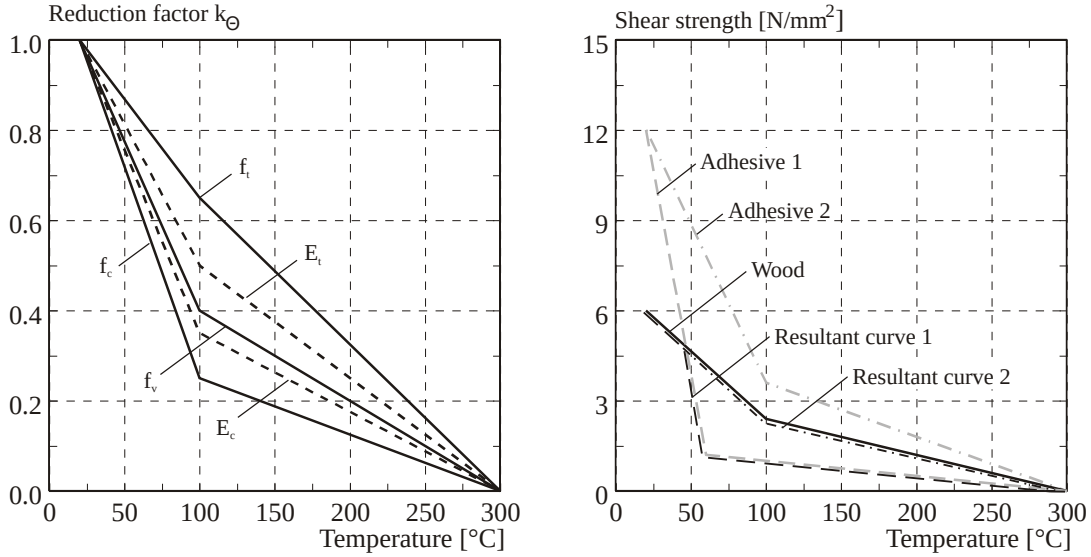


Abbildung 3. Reduktionsbeiwerte für Festigkeit und Steifigkeit von Holz gemäß EN 1995-1-2 [5] (links); Schubfestigkeit von Holz und verschiedene vereinfachte Annahmen für die Schubfestigkeit des Klebstoffes in der Klebfuge als Funktion der Temperatur (rechts)

Mit den beschriebenen Inputparametern wurde für unterschiedliche Brandeinwirkungsdauern die Normal- und Schubspannungsverteilung bei Eintritt eines Biegeversagens berechnet. Die berechnete Schubspannungsverteilung stellt dabei die maximale Einwirkung in der Klebfuge infolge einer Schubbeanspruchung dar.

Der Schubwiderstand in der Klebfuge eines Brettschichtholzträgers wurde in Abhängigkeit der Temperaturverteilung im Querschnitt sowie der temperaturabhängigen Materialeigenschaften von Holz und Klebstoff berechnet. Die temperaturabhängige Reduktion der Holzschubfestigkeit wurde gemäß EN 1995-1-2 mit einem Knickpunkt bei einer Temperatur

von 100°C (mit 40% der Schubfestigkeit bei Normaltemperatur) berechnet. Für die Abnahme der Schubfestigkeit des Klebstoffes mit zunehmenden Temperaturen existieren in Literatur oder Normen keine Angaben. Für die durchgeführten Berechnungen wurden aus diesem Grund mit den folgenden beiden temperaturabhängigen Festigkeitsabnahmen zwei Grenzfälle untersucht (vgl. Abbildung 3, rechts):

- Ein bi-linearer Ansatz mit einem Knickpunkt bei 60°C (mit einer reduzierten Festigkeit von 10% der ursprünglichen Festigkeit bei Normaltemperatur) repräsentiert einen Klebstoff, der sensitiv auf eine Temperatureinwirkung reagiert und eine geringe Festigkeit bei schon relativ geringen Temperaturen aufweist (Ansatz: Adhesive 1).
- Ein bi-linearer Ansatz mit einem Knickpunkt bei 100°C (mit einer reduzierten Festigkeit von 40% der ursprünglichen Festigkeit bei Normaltemperatur) repräsentiert einen Klebstoff, der eine relativ geringe Festigkeitsabnahme mit zunehmenden Temperaturen und hohe thermische Stabilität aufweist und die Festigkeit weniger stark abnimmt als bei obigem Ansatz (Ansatz: Adhesive 2).

Die resultierende Schubfestigkeit in der Klebfuge wird berechnet aus einem Minimum der Holz- und Klebstofffestigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur. Die für Klebstoff 1 (Adhesive 1) angenommenen Materialeigenschaften führen zu einer temperaturabhängigen Festigkeit in der Klebfuge gemäß der Resultierenden 1 (Resultant curve 1). Für Klebstoff 2 (Adhesive 2) ergibt sich die Festigkeit in der Klebfuge gemäß der Resultierenden 2 (Resultant curve 2). Durch die Temperatureinwirkung im Brandfall stellt sich ein Temperaturgradient im Querschnitt ein. Dies führt dazu, dass für die Resultierende 1 in den äußeren Regionen des Querschnittes mit hohen Temperaturen die Schubfestigkeit in der Klebfuge von der Festigkeit des Klebstoffes dominiert wird (Kohäsionsbindung). In den inneren und entsprechend kälteren Regionen des Querschnittes wird die resultierende Schubfestigkeit durch die Festigkeit des Holzes limitiert (Adhäsionsbindung).

Zur Untersuchung des Einflusses des Klebstoffes in der flächigen Verklebung zwischen den einzelnen Brettlamellen eines Brettschichtholzträgers wurden mit dem beschriebenen Modell Querschnitte mit einer Höhe von 200 mm und verschiedener Breite von 40, 60, 100 und 140 mm untersucht. Schmale Querschnitte wurden gewählt, da die Tragfestigkeit dieser besonders stark von einem Brand beeinflusst wird. Die Querschnitte wurden einem dreiseitigen Brand ausgesetzt. Die obere Seite des Querschnittes wurde als vor dem Brand geschützt angenommen. Die Untersuchungen wurden an einem Einfeldträger als statisches System durchgeführt mit einer gleichförmig verteilten Belastung. Detaillierte weiterführende Ausführungen der Berechnungen können [15] entnommen werden.

Trotz der sehr konservativen Annahme einer starken Abnahme der Festigkeit des Klebstoffes (Resultant curve 1) mit zunehmenden Temperaturen konnte gezeigt werden, dass der Schubwiderstand während der gesamten Branddauer grösser als die Einwirkung in der Klebfuge ist. Ein Biegeversagen wird auch bei sehr dünnen Querschnitten (40 mm) zum Versagen des Querschnittes führen.

Auch wenn die Klebstofffestigkeit durch Temperatureinwirkung stark reduziert wird, ist bei üblichen Bemessungssituationen ein Biegeversagen maßgebend. Ein Versagen in der Klebstofffuge ist kaum maßgebend.

3.2. Keilzinkungen

Zur Untersuchung der Tragfähigkeit von keilgezinkten Brettschichtholzlamellen wurden in einem ersten Schritt Zugversuche bei konstanten hohen Temperaturen durchgeführt [14]. Die Prüfkörper wurden dabei zunächst in einem Ofen auf eine Zieltemperatur (20, 60, 100, 140°C) erwärmt und anschließend in einer Zugprüfung bis zum Bruch belastet. In der Keilzinkung wurde das Tragverhalten von fünf verschiedenen Klebstoffen untersucht (vier PUR-Klebstoffe und ein MUF-Klebstoff). In diesen Versuchen bei konstanten hohen Temperaturen wurde eine Abhängigkeit der erreichten maximalen Bruchlast von dem in der Keilzinkung verwendeten Klebstoff festgestellt (vgl. Abbildung 4).

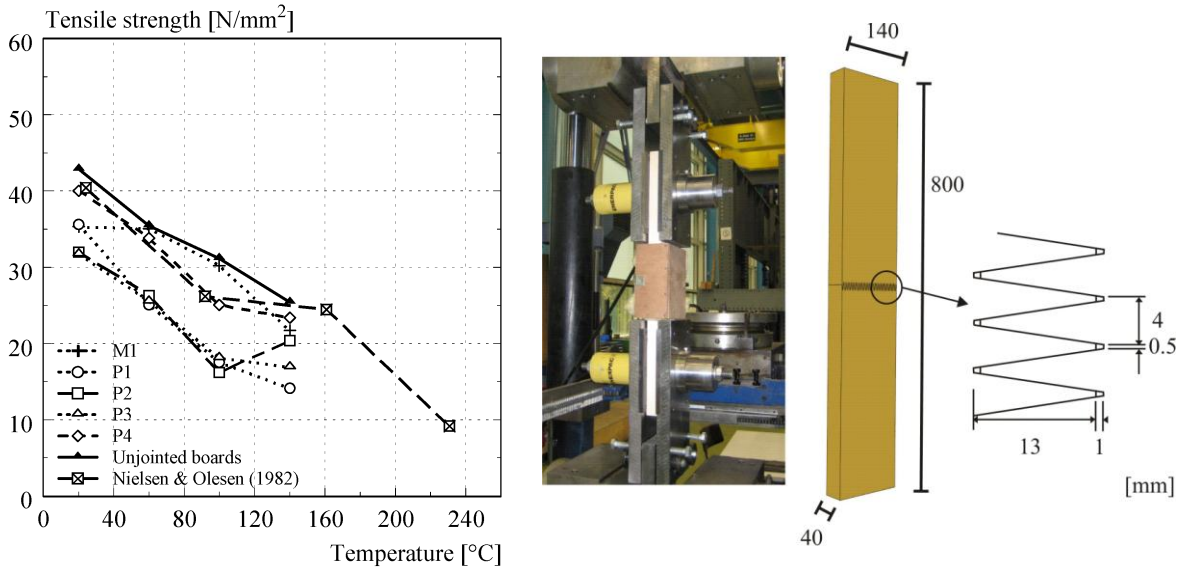


Abbildung 4: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur für die untersuchten Klebstoffe sowie für die Referenzversuche an Prüfkörpern ohne Keilzinkung (links); Zugeinrichtung der Zugversuche mit Prüfkörpergeometrie (rechts).

Zu bemerken ist, dass in Versuchen bei konstanten Temperaturen zum einen kein instationärer Temperaturgradient bzw. Feuchtegradient wie im Brandfall vorhanden ist und zum anderen bei Temperaturen über 100°C das Holz ausgetrocknet wird, wodurch eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften resultiert. Aus diesen Gründen kann mit diesen Versuchen das reale Tragverhalten für den Brandfall nur begrenzt abgebildet werden [17].

Um das reale Tragverhalten von keilgezinkten Brettschichtholzlamellen im Brandfall zu untersuchen, wurden umfangreiche Brandversuche nach ISO 834 an der Empa in Dübendorf durchgeführt. Die Versuchskörper für die Brandversuche entsprachen hinsichtlich der Materialeigenschaften (Festigkeitsklasse C30 nach EN 338 [10]) sowie der Ausbildung der Keilzinkung denen der Versuche bei konstanten hohen Temperaturen. Zudem wurden drei der schon bei den Versuchen bei konstanten hohen Temperaturen geprüften Klebstoffe untersucht (zwei PUR-Klebstoffe (mit Bezeichnung P2 und P4) und ein MUF-Klebstoff). Hierdurch ist ein direkter Vergleich zwischen diesen beiden Versuchsarten möglich.
Neben den Klebstoffen wurden der Einfluss der Breite der Probekörper, der Belastung sowie der Brandeinwirkung auf die Tragfähigkeit der keilgezinkten Brettschichtholzlamelle untersucht.

Die Geometrie des Probekörpers und der Ablauf der Brandversuche wurde so gewählt, um

- den Einfluss der Keilzinkung im Allgemeinen und insbesondere den Einfluss verschiedener Klebstoffe auf die Tragfähigkeit zu untersuchen.
- ein Versagen zu unterschiedlichen Branddauern zu erreichen und somit die Festigkeit des Klebstoffes bei verschiedenen Temperaturprofilen im Querschnitt zu untersuchen.
- den Unterschied in der Versagenszeit von an verschiedenen Stellen in Querschnittshöhe positionierten keilgezinkten Holzlamellen zu ermitteln. Dies wurde anhand von Versuchen untersucht, bei denen die keilgezinkte Brettlamelle im Vergleich zu Probekörper in Abbildung 5 lediglich durch eine 40 mm dicke Brettlamelle an ihrer Unterseite geschützt wurde.
- eine Korrelation zwischen den Zugversuchen bei konstanten hohen Temperaturen und den Brandversuchen herzustellen.
- eine reine Zugbelastung in der Prüflamelle zu erreichen (und keine Biegebeanspruchung und linearen Spannungsverlauf über die Höhe der Prüflamelle).

Die gewählte konstante Zugbelastung während den Brandversuchen entsprach ca. 30% des bei Normaltemperatur ermittelten Zugwiderstandes. Dieses Lastniveau ergibt sich typischerweise unter Berücksichtigung der Bemessung bei Normaltemperatur nach EN 1995-1-1 [4] bzw. im Brandfall nach EN 1995-1-2 [5]. Abbildung 5 zeigt den Standardaufbau und die Abmessungen des Probekörpers im Brandversuch. Der Probekörper bestand aus einer Prüflamelle mit einer Keilzinkung in der Mitte. Auf der Unter- und Oberseite wurden sogenannte Schutzlamellen angebracht, die aus jeweils drei 40 mm dicken Brettlamellen bestanden. Hierdurch konnte bei diesen Versuchen während der gesamten Branddauer ein 1-dimensionaler Abbrand von beiden Seiten im Bereich der Keilzinkung sichergestellt werden, wodurch sich die Auswertung der Versuchsresultate wesentlich vereinfachte. Zudem ist zu beachten, dass aufgrund der Bemessung bei Normaltemperatur und des im Brandfall erwarteten geringen Lastniveaus, Brettschichtholzträger in der Regel versagen, wenn die untere Lamelle schon vollständig verkohlt ist.

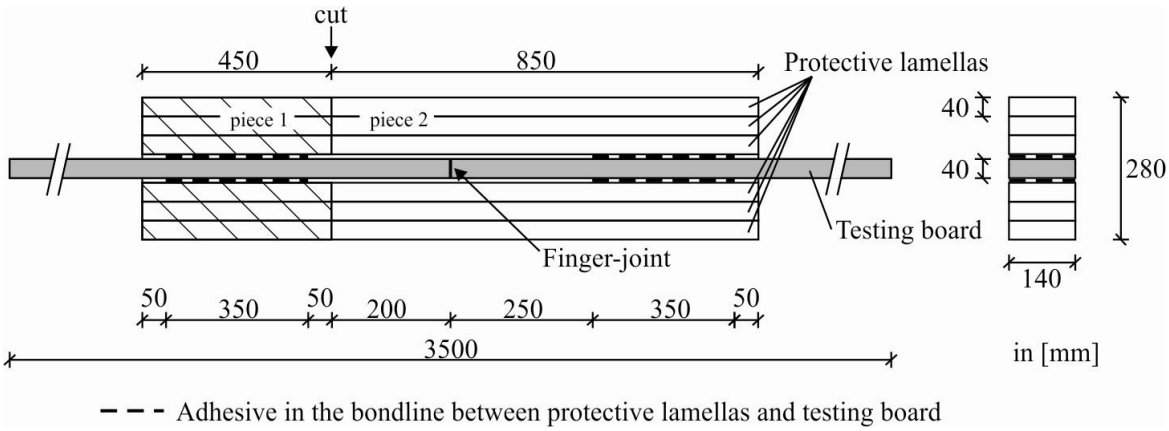


Abbildung 5: Standardaufbau und -abmessungen der Probekörper im Brandversuch.

Die Versuchsdurchführung erfolgte gemäß EN 1363-1 [8] mit einer auf den Prüfkörper aufgebrachten konstanten Zugkraft. Abbildung 6, links zeigt die Zugeinrichtung auf dem Horizontalofen. Während des Brandversuchs wurde der Brandraum mit einer Abdeckung geschlossen. Nach dem Brandversuch wurde der Brandraum geöffnet, der Versuchskörper (vgl. Abbildung 6, rechts) aus dem Brandraum gehoben und sofort mit Wasser abgelöscht. Bei zwei Probekörpern wurden bei der Herstellung jeweils 20 Thermoelemente angeordnet, um während des Brandversuchs den Temperaturgradienten im Querschnitt zu messen. Die Temperaturen wurden im Abstand von 30, 50 und 70 mm zur feuerzugewandten Seite gemessen. Die Temperaturen wurden zudem mit Hilfe einer thermischen finiten Elemente Analyse berechnet, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen Temperaturen und thermischer Analyse festgestellt (vgl. Abbildung 8, links).

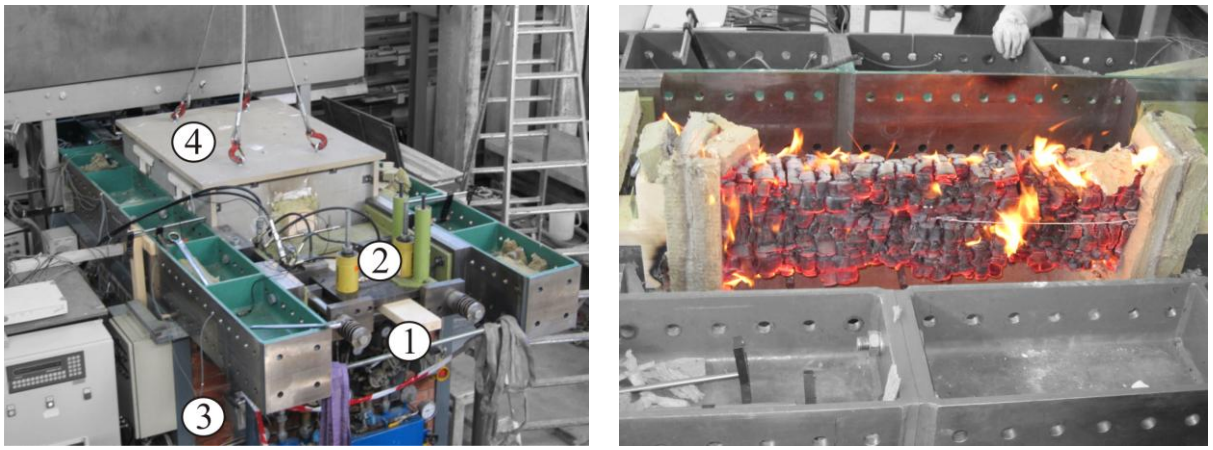


Abbildung 6: Aufbau der Brandversuche: Eingebauter Prüfkörper (1) in Zugeinrichtung (2) auf kleinem Horizontalofen (3) der Empa. Mit einer Abdeckung (4) wird der Brandraum verschlossen (links); Prüfkörper nach dem Brandversuch (rechts).

Anhand der Brandversuche konnte das reale Tragverhalten der Keilzinkenverbindung im Brandfall sehr gut untersucht werden. Der Aufbau der Prüfkörper wurde so gewählt, dass ein Versagen in der Keilzinkung eintreten sollte. Zudem wurde Holz der Festigkeitsklasse C30 nach EN 338 [10] (höchste visuell sortierte Festigkeitsklasse) verwendet. Allerdings erfolgte bei einigen Versuchen das Versagen außerhalb der Keilzinkung im Bereich eines Astes. Dies deutet darauf hin, dass die Keilzinkung (unabhängig des verwendeten Klebstoffes) bei Holz normaler Festigkeitsklassen die Tragfähigkeit im Brandfall kaum beeinflussen sollte. Abbildung 7 zeigt die in den Brandversuchen beobachteten Bruchbilder. Das Versagen trat grundsätzlich in der Keilzinkung, außerhalb der Keilzinkung sowie in Form eines Mischversagens auf. Beim „Versagen in der Keilzinkung" wurde zudem zwischen einem Versagen entlang der Keilzinken und einem Versagen durch Erreichen der Zugfestigkeit der Holzfasern im Bereich der Keilzinkung unterschieden.

Abbildung 7: Beobachtete Bruchbilder bei den Brandversuchen: Versagen in der Keilzinkung (links), Versagen außerhalb der Keilzinkung durch Ast (mitte), Mischversagen (rechts).

Abbildung 8, rechts zeigt den Feuerwiderstand von den Brettschichtholzlamellen unterschiedlicher Breite in Abhängigkeit der Versagensart gemäß Abbildung 7, die dabei mit einer konstanten Zugkraft von etwa 30% des Zugwiderstandes bei Normaltemperatur belastet wurden. Unter Berücksichtigung der beobachteten Bruchbilder lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den geprüften Klebstoffen feststellen. Bei den 140 mm breiten Brettschichtholzlamellen konnte tendenziell beobachtet werden, dass je kleiner der Feuerwiderstand war, desto grösser war der Anteil eines Holzversagens im Querschnitt. Trat ein Versagen im Bereich der Keilzinkung bei verhältnismäßig geringer Brandzeit auf (geringer Feuerwiderstand des Prüfkörpers), so war ein großer Anteil Holzbruch vorhanden; d.h. die Holzzugfestigkeit war für den Feuerwiderstand maßgebend. Die ausführlichen Ergebnisse der Brandversuche an keilgezinkten Brettschichtholzlamellen können [16] entnommen werden.

Die Versuchsresultate wurden mit dem rechnerischen Feuerwiderstand gemäß EN 1995-1-2 verglichen. Es zeigte sich, dass die gemessenen Feuerwiderstände bei einem Versagen entlang der Keilzinken über den rechnerischen Feuerwiderstand gemäß EN 1995-1-2 lagen. Die durchgeführten Brandversuche haben damit gezeigt, dass die untersuchten Klebstoffe eine ausreichende Festigkeit für den Brandfall aufweisen.

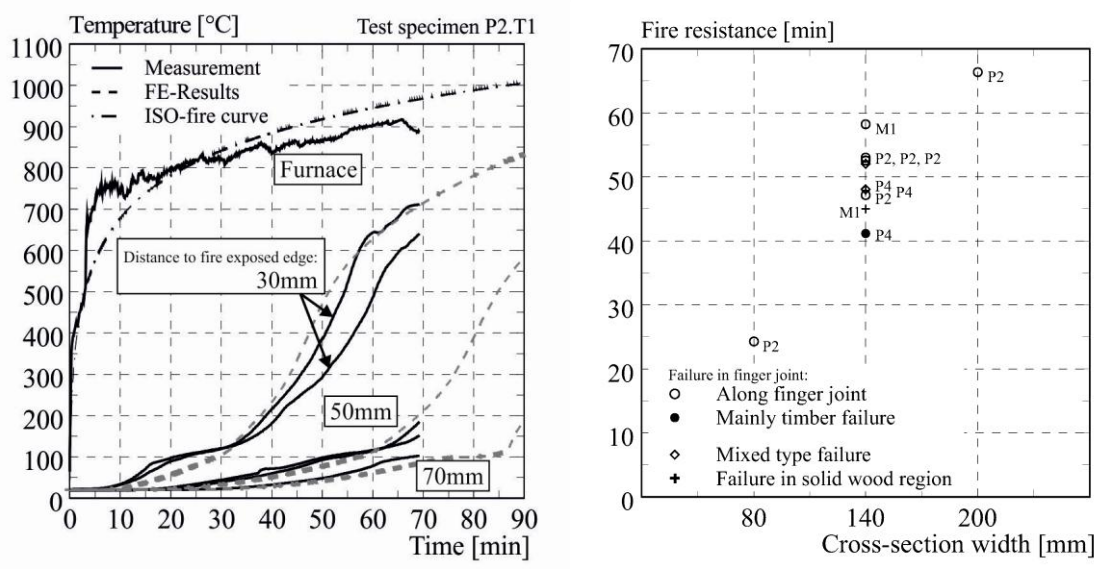


Abbildung 8: Vergleich zwischen gemessenen und mit FEM berechneten Temperaturen (links); Feuerwiderstand der Versuche mit Prüfkörper gemäß Abbildung 5 für verschiedene Breiten in Abhängigkeit der Versagensart gemäß Abbildung 7 (mit P2, P4, M1 als Bezeichnung des Klebstoffes in der Keilzinkung) (rechts).

Die Kombination und der Vergleich der Versuche an keilgezinkten Brettschichtholzlamellen bei konstanten hohen Temperaturen mit den Brandversuchen sind von grundlegender Bedeutung. Durch eine „Materialprüfung" mit Hilfe von Kleinkörperversuchen kann die Festigkeitsabnahme der Klebstoffe mit zunehmender Temperatur bestimmt werden. Allerdings ist es wichtig, dass die Tragfähigkeit des gesamten Bauteils (hier: Brettschichtholzträger als Zusammenwirken von Holz und Klebstoff) im Brandfall ermittelt wird. So kann auch ein Klebstoff mit relativ geringen Festigkeiten in einer „Materialprüfung" bei konstanten hohen Temperaturen in einem Bauteil im Brandfall ausreichende Festigkeiten besitzen, wie die durchgeführten Versuchsserien gezeigt haben.

4. Brandverhalten von Brettsperrholzplatten

Brettsperrholzplatten (BSP) stellen ein technisch und wirtschaftlich interessantes Produkt für den „modernen" Massivholzbau dar und finden in den letzten Jahren einen vermehrten Einsatz als großformatige Wand-, Decken- und Dachelemente im Wohn-, Industrie- und Gewerbebau. Für die Verklebung der einzelnen Brettlagen werden für den strukturellen Holzleimbau zugelassene Klebstoffe eingesetzt. Um das Brandverhalten von Brettsperrholzplatten zu untersuchen, wurden in den letzten Jahren umfangreiche Versuchsserien durchgeführt [12,13,23]. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Versuche können dem folgenden Abschnitt entnommen werden.

Im Rahmen einer ersten Versuchsserie wurde das Brandverhalten von kleinformatigen Deckenelementen aus mehrschichtigen Holzplatten untersucht [12,13]. Alle Brandversuche wurden an der Empa in Dübendorf auf dem kleinen Horizontalofen unter ISO-Normbrandbeanspruchung durchgeführt. Die Brandversuche zeigten, dass die untersuchten Deckenelemente aus mehrschichtigen Holzplatten ein ungünstigeres Brandverhalten aufwiesen als Massivholzplatten. Der Grund dafür war das beobachtete Ablösen der einzelnen Schichten nach dem Durchbrand, was zu einer Erhöhung des Abbrandes im Vergleich zum Massivholz führte. Bei den Massivholzplatten blieb die Kohleschicht länger mit dem unverbrannten Restquerschnitt in Kontakt und schützte damit den Restquerschnitt vor der direkten Brandeinwirkung. Die Resultate der Brandversuche wurden durch numerische Simulationen bestätigt. Es zeigte sich, dass das Verhalten von dünneren Schichten im Brandfall schlechter ist als von dickeren Schichten.
Im Rahmen eines am Institut CNR-IVALSA in San Michele all'Adige durchgeführten Forschungsprojektes [12] wurde das Brandverhalten von Wänden aus Brettsperrholzplatten (vertikale Tragstruktur) mit zwei Versuchen unter ISO-Normbrandbeanspruchung untersucht. Die Brandversuche wurden am 2 x 2 m großen vertikalen Ofen durchgeführt. Die untersuchen Wänden bestanden aus Brettsperrholzplatten mit 3 bzw. 5 Bretterlagen aus

Nadelholz mit einer Gesamtdicke der Wand von 84 bzw. 85 mm. Die Brandversuche zeigten, dass die gemessenen Abbrandraten in der Größenordnung der eindimensionalen Abbrandrate von 0.65 mm/Min. von Vollholz lagen. Während des Brandversuchs wurde kein Ablösen der einzelnen verkohlten Schichten beobachtet. Im Gegensatz zu den Brandversuchen an horizontalen Plattenelementen wurde somit keine Erhöhung der Abbrandrate infolge Ablösen der einzelnen Schichten gemessen.

Als Berechnungsgrundlage für die Brandbemessung von Brettsperrholz-Elementen kann die Bemessungsmethode mit reduziertem Querschnitt gemäß EN 1995-1-2 verwendet werden [11,22,23]. Für die Ermittlung des Restquerschnittes kann bei Wänden die eindimensionale Abbrandrate angenommen werden (siehe Abbildung 9, rechts). Bei Decken ist das Brandverhalten durch das Verhalten der einzelnen Bretterlagen charakterisiert. Folgende zwei Grenzsitua-tionen können angenommen werden:

- wenn sich die einzelnen Schichten der Brettsperrholzplatte nach der Verkohlung nicht ablösen, schützt die sich bildende Holzkohleschicht den verbleibenden nichtverkohlten Teil der Brettsperrholzplatte vor der Wärmeeinwirkung. In diesem Fall ist für Brettsperrholz ein ähnliches Brandverhalten wie Vollholz zu erwarten und die eindimensionale Abbrandrate von β_0 = 0.65 mm/Min. kann angenommen werden.
- wenn sich Teile der einzelnen Schichten der Brettsperrholzplatte nach der Verkohlung ablösen, geht die Schutzwirkung der sich bildenden Holzkohleschicht verloren. Nach der Verkohlung und dem Ablösen jeder einzelnen Schicht ist in diesem Fall wegen der steigenden Brandraumtemperatur mit einem erhöhten Abbrand zu rechnen. Vereinfacht kann dieses Phänomen mit einer doppelten Abbrandrate von $2 \cdot \beta_0$ = 1.3 mm/Min berücksichtigt werden, bis sich eine Holzkohleschicht von 25 mm gebildet hat. Nach der Bildung einer Holzkohleschicht von 25 mm kann die eindimensionale Abbrandrate von β_0 = 0.65 mm/Min. wieder angenommen werden, falls es nicht vorher zu einem erneuten Abfall der Holzkohleschicht kommt (siehe Abbildung 9, links). Dieses einfache Modell für die Ermittlung der Abbrandtiefe liefert im Vergleich zu Brandversuchen gute Resultate [13].

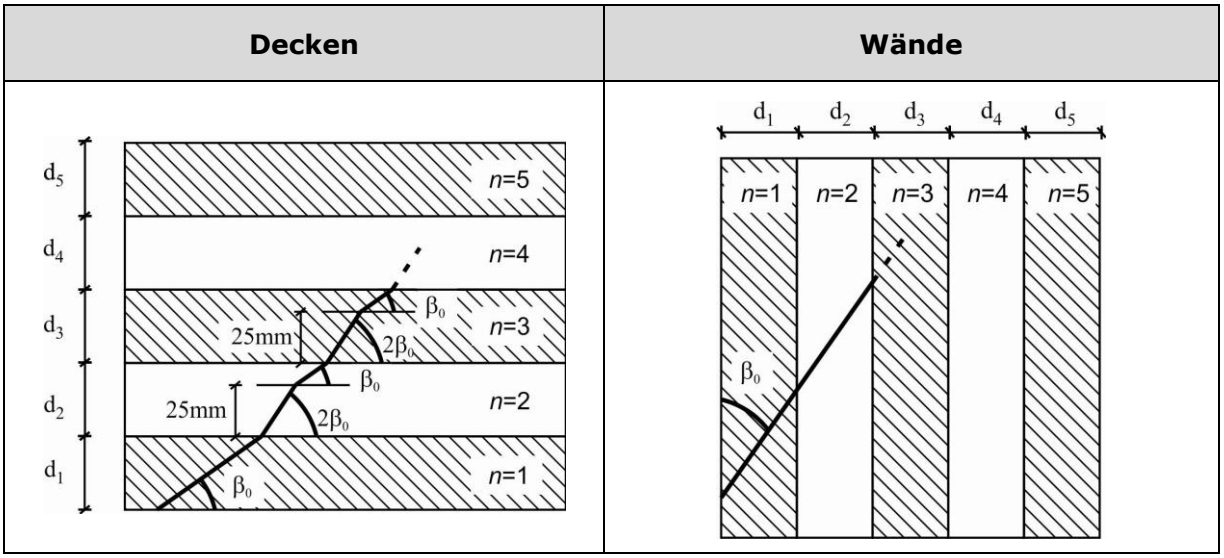


Abbildung 9: Berechnung der Abbrandtiefe bei Querschnitten aus Brettsperrholz für Decken (links) und Wände (rechts) mit Schichtdicke d_n und Abbrandrate β_0 = 0.65 mm/Min.

Durch die bei Decken mögliche erhöhte Abbrandrate infolge sich ablösender Teile der Holzkohleschicht stellt sich die Frage, ob die Brandbemessung einer Brettsperrholzplatte eine Veränderung des durch die geführten Nachweise bei Normaltemperatur ergebenen Aufbaus hervorruft (Nachweise der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit bei Normaltemperatur).

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse von Brandbemessungen mit auf dem Markt üblicherweise verwendeten 5-Schicht-Platten für eine Brandeinwirkung von 60 Minuten. In Anlehnung an das Beispiel in [22] wurde ein Einfamilienhaus mit einem statischen System für die zu

bemessende Decke von einem symmetrischen Zweifeldträger mit einer Spannweite von 5.0 m angenommen. Ständige Einwirkungen von 2.0 N/mm^2 und veränderliche Einwirkungen von 2.1 N/mm^2 wurden dabei angenommen, wobei bei der Brandbemessung die veränderlichen Einwirkungen mit dem Faktor Ψ_2 = 0.3 berücksichtigt wurden. Untersucht wurden BSP-Platten mit unterschiedlicher Gesamtdicke von 120 bis 175 mm sowie BSP-Platten mit unterschiedlicher Schichtdicke auf der feuerzugewandten Seite. Die Bemessung für eine Brandeinwirkung von 60 Minuten erfolgte in Anlehnung an [22] mit dem reduzierten Querschnitt gemäß EN 1995-1-2. Der verbleibende Restquerschnitt wurde gemäß Abbildung 9 mit und ohne Berücksichtigung des Ablösens der Holzkohleschicht berechnet. In Tabelle 1 wird der Quotient aus dem berechneten Bemessungswert der Biegebeanspruchung für den Brandfall $M_{d,fi}$ und dem berechneten Bemessungswert des Biegewiderstandes $M_{R,d,fi}$ nach 60 Minuten Brandeinwirkung angegeben. Der Bemessungswert des Biegewiderstandes $M_{R,d,fi}$ wurde mit dem 20% Fraktilwert der Biegefestigkeit der BSP-Platte berechnet (k_{fi} = 1.15).

Tabelle 1: Ergebnisse der Bemessungsbeispiele für eine Brandbemessung nach 60 Minuten Brandeinwirkung

Schichtaufbau BSP-Platte [mm]	24/24/24/ 24/24	19/34/19/ 34/19	19/44/19/ 44/19	34/22/34/ 22/34	35/35/35/ 35/35
Dicke äußere Schicht [mm]	24	19	19	34	35
Gesamtdicke BSP-Platte [mm]	120	125	145	146	175
Brandbemessung, **mit** Ablösen: $M_{d,fi}/M_{R,d,fi}$	0.44	0.68	0.23	0.14	0.11
Brandbemessung, **ohne** Ablösen: $M_{d,fi}/M_{R,d,fi}$	0.22	0.24	0.20	0.14	0.11

Die Beispiele zeigen, dass die Bemessung für eine Brandeinwirkung von 60 Minuten auch unter Berücksichtigung des Ablösens der Holzkohleschicht immer deutlich erfüllt ist. Der größte Wert des Verhältnisses $M_{d,fi}/M_{R,d,fi}$ betrug 0.68. Für übliche Bemessungssituationen wird erwartet, dass keine Veränderung des Schichtaufbaus bzw. der Gesamtdicke infolge der Brandbemessung der BSP-Platte der Decke erforderlich wird.

5. Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel fasst die wesentlichen Resultate und Erkenntnisse von umfangreichen numerischen und experimentellen Untersuchungen zum Einfluss des Klebstoffes auf die Tragfähigkeit im Brandfall von Brettschichtholz und Brettsperrholz zusammen.

Für Brettschichtholz wurde der Einfluss der Klebstoffe in der flächigen Verklebung (zwischen den Brettlamellen) sowie in der Keilzinkung (Längsverbindung) untersucht. Bei der flächigen Verklebung zeigte sich anhand der numerischen Untersuchungen, dass auch wenn die Klebstofffestigkeit durch Temperatureinwirkung stark reduziert wird, für die Tragfähigkeit ein Biegeversagen maßgebend wird. Ein Versagen in der Klebstofffuge wird auch mit Klebstoffen mit geringer thermischer Stabilität kaum maßgebend.
Die Brandversuche an keilgezinkten Brettschichtholzlamellen zeigten, dass der Feuerwiderstand von der Versagensart dominiert wird. Unter Berücksichtigung der beobachteten Bruchbilder lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den geprüften Klebstoffen feststellen. Die Versuchsresultate wurden mit dem rechnerischen Feuerwiderstand gemäß EN 1995-1-2 verglichen. Es zeigte sich, dass die gemessenen Feuerwiderstände bei einem Versagen entlang der Keilzinken über dem rechnerischen Feuerwiderstand gemäß EN 1995-1-2 lagen. Die durchgeführten Brandversuche haben damit gezeigt, dass die untersuchten Klebstoffe eine ausreichende Festigkeit für den Brandfall aufweisen.

Für Brettsperrholz zeigten experimentelle Untersuchungen ein unterschiedliches Brandverhalten zwischen Wand- und Deckenelementen. Für Deckenelemente wurde ein Ablösen von Schichtteilen beobachtet. Dies führte zu einem erhöhten Abbrand in diesen Bereichen. Bei Wandelementen hingegen wurde das Phänomen von ablösenden Schichtteilen

nicht festgestellt. Für die Ermittlung des Restquerschnittes kann bei Wänden die eindimensionale Abbrandrate angenommen werden. Bei Decken kann das Phänomen von ablösenden Schichtteilen mit einer Verdopplung der Abbrandrate rechnerisch vereinfacht berücksichtigt werden. Dieser Ansatz wird auch zur Bemessung von geschützten Holzbauteilen nach dem Versagen der Schutzschicht gemäß EN 1995-1-2 zugrunde gelegt. Anhand von Beispielen zur Brandbemessung von handelsüblichen BSP-Platten wurde gezeigt, dass die Brandbemessung bei der Mehrzahl von handelsüblichen BSP-Platten trotz ablösender Schichtteile zu keiner Veränderung des Schichtaufbaus bzw. der Gesamtdicke der BSP-Platte bei Decken führt.

6. Literatur

[1] ASTM D7247 - 07ae1 (2007): Standard Test Method for Evaluating the Shear Strength of Adhesive Bonds in Laminated Wood Products at Elevated Temperatures.

[2] Clauss S, Joscak M, Niemz P: Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests, *European Journal of Wood and Wood Products*, 2010. DOI: 10.1007/s00107-010-0411-4

[3] Dassault Systems Simulia: ABAQUS Online Documentation. Version 6.10 EF, 2010.

[4] EN 1995-1-1 (2004): Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.

[5] EN 1995-1-2 (2004): Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.

[6] EN 301 (2006): Adhesives - Phenolic and aminoplastic - For load-bearing timber structures – Classification and performance requirements.

[7] EN 15425 (2008): Adhesives - One component polyurethane for load bearing timber structures - Classification and performance requirements.

[8] EN 1363-1 (1999): Fire resistance tests - Part 1: General requirements.

[9] ISO 834 (1999): Fire-Resistance Tests - Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements International Organisation for Standardisation.

[10] EN 338 (2009): Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen.

[11] European Project FireInTimber: Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe, SP-Report 2010:19, Stockholm, 2010.

[12] Frangi A, Fontana M, Bochicchio G: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Brandverhalten von Brettsperrholzplatten, *Bauphysik* 2007; 29: 387–397, DOI: 10.1002/bapi.200710050.

[13] Frangi A, Fontana M, Hugi E, Jöbstl R: Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire, *Fire Safety Journal 2009*; 44: 1078–1087, DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.07.007.

[14] Frangi A, Bertocchi M, Clauß S, Niemz P: Mechanical behaviour of finger joints at elevated temperatures, *Wood Science Technology*, Paper in press, DOI: 10.1007/s00226-011-0444-9.

[15] Klippel M, Frangi A, Fontana M: Influence of the Adhesive on the Load-Carrying Capacity of Glued Laminated Timber Members in Fire, *Fire Safety Science 2011 (IAFSS)*, 2011, University of Maryland, USA.

[16] Klippel M, Frangi A, Fontana M: Versuche an keilgezinkten Holzlamellen bei Normbrandbedingung, Versuchsbericht, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, 2012, Report in press.

[17] König J: Structural fire design according to Eurocode 5 - Design rules and their background, *Fire and Materials* 2005; 29:147–163.
DOI: 10.1002/fam.873

[18] König J, Norén J, Sterley M: Effect of adhesives on finger joint performance in fire, Paper CIB-W18/41-16-1, Proceedings of 41th CIB-W18 Meeting, St. Andrews, Canada, 2008.

[19] König J, Walleij L: One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situation. Swedish Institute for Wood Technology, Trätek Report I 9908029, Stockholm, 1999.

[20] Nielsen PC, Olesen FB: Tensile strength of finger joints at elevated temperatures, Institute of Building Technology and Structural Engineering, Report No. 8205, Aalborg University, 1982, Denmark.

[21] Schickhofer G: Fallbeispiele Österreich, Tagungsband zur Veranstaltung „Erfolgreiche Holzprodukte", ETH Zürich, 25. August 2005.

[22] Schickhofer G: Bogensperger T., Moosbrugger T., Herausgeber: BSPhandbuch. Verlag der Technischen Universität Graz, 2. Auflage, ISBN 978-3-85125-109-8, 2010.

[23] Schmid J, König J, Köhler J: Fire exposed cross-laminated timber – modelling and tests, Paper CIB-W18/43-16-2, Proceedings of 43th CIB-W18 Meeting, Nelson, 2010.