

# Brettsperrholz im Brandfall

Joachim Schmid  
IBK/ETH Zürich  
Zürich, Schweiz



Michael Klippel  
IBK/ETH Zürich  
Zürich, Schweiz



Andrea Frangi  
IBK/ETH Zürich  
Zürich, Schweiz





# Brettsperrholz im Brandfall – Prüfung und Bemessung

## 1. Einleitung

Brettsperrholz (BSP) ist ein relativ neues Holzprodukt, welches als tragender Bauteil für Wand-, Decken- und Dachelemente für innovative und qualitativ hochwertige Holzkonstruktionen verwendet werden kann. Es ermöglicht die schnelle Umsetzung von Bauprojekten durch den hohen Grad an Vorfertigung in Elementen oder auch Modulen. Die Verwendung von BSP kann auch im Brandfall von Vorteil sein, da die Gefahr der Brandausbreitung durch Hohlräume im Vergleich zur Holzrahmenbauweise reduziert wird. Es sollte jedoch beachtet werden, dass eventuell sichtbare, d.h. ungeschützte Holzoberflächen die Brandlast in Räumen erhöhen.

In der Regel wird BSP aus keilgezinkten Nadelholzlamellen hergestellt, zwischen ca. 10 und 45 mm stark und 80 bis 240 mm breit. Die Anzahl der Lagen ist eine ungerade Zahl und reicht von drei bis neun, aneinander folgende Lagen werden um 90° verdreht verklebt. Auch die Entwicklung von Bemessungsverfahren wird hierdurch komplex. Für die Verklebung kommen verschiedene Klebstoffe, in der Regel Einkomponentenkleber PUR (Polyurethan) oder Mehrkomponentenkleber MUF (Melamin Urea Formaldehyd) oder seltener PRF (Phenol-Resorzinol-Formaldehyd) zum Einsatz. Die aktuell große Produktvielfalt stellt eine Schwierigkeit in der Verfügbarkeit und Austauschbarkeit der Produkte dar. Der aktuelle Vorschlag für eine Produktnorm lässt Abstände zwischen den Lamellen (Spalten) von 6 mm zu [2].

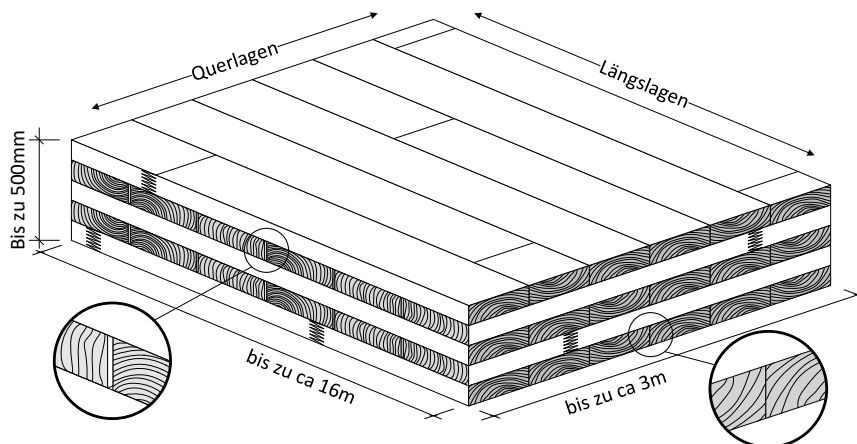


Abbildung 1: Schematisches Beispiel eines fünflagigen BSP ( $i = 5$ ) mit ausgebildeten Spalten in den Querlagen; modifiziert übernommen von [3].

Aufgrund der flächenartigen Natur dieses Bauproduktes könnte man bei Decken von einem zweidimensionalen Tragewerke ausgehen was jedoch an Grenzen stößt, da die Verbindungstechnik für aneinandergereihte Elemente noch keine geeigneten Verbindungen bietet. Daher wird in der Bemessung oft von einem Ein- oder Mehrfeldträger mit entsprechender Breite ausgegangen; somit entstehen im BSP Lagen in Längs- und Querrichtung. Hierbei ist es gängige Praxis, die untere und obere Lage als Längs-lagen in Richtung der Spannweite anzuordnen (siehe Abb. 1).

Brennbare Baustoffe brennen an ihrer Oberfläche, wobei sie Energie freisetzen und so zur Brandausbreitung und Brandentwicklung beitragen können. Da i.d.R. für Holzbauteile bzw. Holzgebäude die gleichen Anforderungen an den Feuerwiderstand gelten wie für Bauteile und Gebäude aus nicht brennbaren, stellt die Kenntnis und Umsetzung des Brandverhaltens eine Grundvoraussetzung für die Verwendung von BSP dar.

## 1.1. Grundlagen für die Brandbemessung

Brandsicherheit ist eine grundlegende Forderung unserer Gesellschaft auch an Gebäude und Bauprodukte, jedoch ist die quantitative Erfassung dieser, ein sehr komplexes Thema. Die Europäische Union hat in den letzten Jahrzehnten große Anstrengungen unternommen genaue Definitionen für alle Länder abzuleiten, um Verbrauchern und Herstellern einen harmonisierten Markt bieten zu können. Brandsicherheit ist eine grundsätzliche Anforderung an Bauprodukte, die in der Bauproduktenverordnung niedergeschrieben steht [4]. Damit hat Brandsicherheit einen festen Platz in der Europäischen Gesetzgebung im Allgemeinen und in harmonisierten Produktnormen, sogenannte ENhs, gefunden. Neben Produktnormen gibt es in Europa auch Prüfnormen, Klassifizierungsnormen und Bemessungsnormen, welche strikt auseinander zu halten sind.

Im Hinblick auf die Brandbemessung tauchen wiederholt Begriffe auf, die falsch verwendet werden, jedoch durch den Fachmann getrennt betrachtet werden müssen. Hierzu zählen die Begriffe Brandeigenschaft, Brandverhalten, Brennbarkeit und Feuerwiderstand. Brandeigenschaft ist ein weitgehend undefinierter, sehr genereller Überbegriff; während die anderen Begriffe in der Fachwelt als auch der Normung genau definiert sind. Die Unterscheidung der Begriffe steht im Einklang mit dem Verlauf eines realen Brandes. Das Brandverhalten von im Brandraum befindlichen Produkten beeinflusst maßgebend die Phasen Brandentstehung und Brandausbreitung vor dem Brandüberschlag; sie beschreiben damit den Beitrag zur Brandentwicklung. Das Brandverhalten «brennbar» ist eine Teileigenschaft des Brandverhaltens.

Der Brandüberschlag markiert das Ende der Brandentwicklung. Von diesem Zeitpunkt an ist der Feuerwiderstand der strukturellen Bauteile von Bedeutung. Der sprunghafte Anstieg der Temperaturen beim Brandüberschlag wird in Brandversuchen durch eine genormte Temperatur-Zeit-Kurve abgebildet. Diese sogenannte Normbrandkurve hat das Ziel, einen Vollbrand zu simulieren und ist durch den zunehmenden Temperaturverlauf charakterisiert, der keine Abkühlphase kennt.

Zweck von Brandschutzvorschriften ist primär die Gewährleistung der Personensicherheit, inkl. Feuerwehre. Bauteile mit Feuerwiderstand dienen somit primär der Begrenzung der Brandausbreitung zu anderen Brandabschnitten, ein Strukturversagen soll verhindert werden.

In allen Prüfungen zum Brandverhalten und Feuerwiderstand werden Produkte jeweils gleichen Belastungen ausgesetzt um Produkte miteinander vergleichen zu können: Dies sind Temperaturen, Temperatur-Zeit-Kurven beziehungsweise Wärmestromdichten zur Produktoberfläche. Aufgrund des natürlichen Charakters eines realen Brandes ist jedoch zu erwarten, dass die wirkliche Belastung mitunter signifikant von den Prüfannahmen abweicht.

## 1.2. Brandverhalten

Die Klassifizierung des Brandverhaltens verfügt über zwei Untergruppen. Einerseits umfasst es (i) Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen und andererseits (ii) Bodenbeläge. Letztere besteht aus einer ähnlichen Klassifizierung wie (i) jedoch einer anderen Prüfanzordnung. Das Klassifizierungssystem nach EN 13501-1 [5] ist eine nichtlineare Einteilung des Beitrages zur Brandentwicklung in Brandverhaltensklassen A bis F. Verschiedene Prüfungen müssen durchgeführt werden um ein Bauprodukt in diese Klassen einteilen zu können. Ohne ein Vorliegen von Prüfungen beziehungsweise einer Klassifizierung ist die niedrigste Klasse auszuweisen. Holz wurde ursprünglich als Definition der Klasse D herangezogen, welche unbehandeltes, ausreichend starke Holzprodukte charakterisiert.

Das Brandverhalten eines Produktes ist per Definition an dem fertigen Endprodukt festzustellen, d.h. zu prüfen und zu klassifizieren. Je nach angestrebter Klasse gibt es in Summe drei verschiedene Testmethoden. Änderungen am Endprodukt, zum Beispiel durch Behandlungen (Imprägnierungen, Oberflächenbeschichtungen) können zu Änderung des Brandverhaltens führen und ziehen demnach neue Produktprüfungen und -klassifikation nach sich. Demzufolge muss jedes Holzprodukt durch eine Klassifikation abgedeckt werden. Die große Produktvielfalt der Holzprodukte ergäbe allein für Brettschichtholz (BSH) unter Berücksichtigung der Variation der Festigkeitsklasse, Abmessung, Aufbau (Anzahl und Stärke der Lamellen) eine entsprechend große Anzahl an Prüfungen und Klassifizie-

rungen. Diese Klassifizierungen konnten durch eine sogenannte Klassifizierung ohne weitere Prüfung (CWFT) für BSH und Vollholz unter bestimmten Voraussetzungen vermieden werden. Für BSP gibt es dieses CWFT zurzeit noch nicht, jede neue Produktvariation muss der kostenintensiven Prüfung und Klassifizierung unterzogen werden.

Holz- und holzbasierte Produkte können aufgrund des natürlichen Ursprunges und seines natürlichen Aufbaues die Prüfung der Unbrennbarkeit, welche einen der Tests zur Beurteilung des Brandverhaltens darstellt, nicht bestehen (limitierter Masseverlust unter hoher Temperatureinwirkung). Daher können diese Produkte die Brandverhaltensklassen A1 oder A2 nicht erreichen, eine Unbrennbarkeit kann nicht erreicht werden. Durch geeignete Behandlung können Holz- und holzbasierte Produkte die Brandverhaltensklasse B erreichen. Bei jeglicher Art von Behandlung muss allerdings auf die Dauerhaftigkeit dieser Rücksicht genommen werden da Behandlungen oft hygroskopisch sind und ausgewaschen werden können (z.B. bei Fassaden).

Während das Brandverhalten (Brennbarkeit) von Produkten bzw. der Oberflächen in Simulationen zur Brandausbreitung in Räumen oder Gebäuden berücksichtigt werden kann, ist es kaum möglich aufgrund der Zusammensetzung eines Bauproduktes Simulationen durchzuführen, welche auf Brennbarkeitsklassen schließen lassen. Es besteht allerdings die Möglichkeit relativ kostengünstige Prüfungen mit einem sogenannten Kegelkalorimeter durchzuführen um eine Vorhersage der Brennbarkeitsklasse zu tätigen [6].

Hinsichtlich BSP sei abschließend angemerkt, dass die aktuelle Version von prEN 16351 [2] hinsichtlich des Brandverhaltens fehlerhafte Regeln enthält, da die Klassenbestimmung aufgrund der Brandverhaltensklasse von Ausgangsmaterialien durchgeführt werden soll, welches dem Grundsatz widerspricht, dass die Brandverhaltensklasse stets am Endprodukt festzustellen ist. Ein CWFT für BSP könnte hierfür Hilfestellung bieten.

### 1.3. Feuerwiderstand

Der Feuerwiderstand umfasst die drei Eigenschaften Tragfähigkeit (R), Raumabschluss oder Unversehrtheit (E) und Wärmedämmung oder Isolation (I). In der Regel werden letztere beide zum Kriterium der Brandabschnittsbildung (EI) zusammengefasst, welches den Feuerwiderstand bezüglich der Brandausbreitung zu benachbarten Brandabschnitten beschreibt. Die Eigenschaften werden in ihrer Klassifikation mit einer Zahl kombiniert, welche den Feuerwiderstand unter Normbrand in Minuten angibt. Hier sollte festgehalten werden, dass die Tragfähigkeit in Kombination mit einer Zeit klar in Abhängigkeit einer konkreten Belastung steht. Diese Belastung kann eine maximal zulässige Last bei Normaltemperatur sein oder aber auch eine niedrigere. Das heißt, die Beschreibung eines Bauteiles mit lediglich seinem Feuerwiderstandes, z.B. R30, ist unzureichend, da das gleiche Bauteil mit entsprechend geringerer Belastung eventuell auch einen Feuerwiderstand von R60 erreichen könnte.

Der Feuerwiderstand umfasst die drei Eigenschaften Tragfähigkeit (R), Raumabschluss oder Unversehrtheit (E) und Wärmedämmung oder Isolation (I). In der Regel werden letztere beide zum Kriterium der Brandabschnittsbildung (EI) zusammengefasst, welches den Feuerwiderstand bezüglich der Brandausbreitung zu benachbarten Brandabschnitten beschreibt. Die Eigenschaften werden in ihrer Klassifikation mit einer Zahl kombiniert, welche den Feuerwiderstand unter Normbrand in Minuten angibt. Hier sollte festgehalten werden, dass die Tragfähigkeit in Kombination mit einer Zeit klar in Abhängigkeit einer konkreten Belastung steht. Diese Belastung kann eine maximal zulässige Last bei Normaltemperatur sein oder aber auch eine niedrigere. Das heißt, die Beschreibung eines Bauteiles mit lediglich seinem Feuerwiderstandes, z.B. R30, ist unzureichend, da das gleiche Bauteil mit entsprechend geringerer Belastung eventuell auch einen Feuerwiderstand von R60 erreichen könnte.

Generell sind entsprechende Nachweise für den Feuerwiderstand von Bauteilen beziehungsweise Baukonstruktionen durch geeignete Brandversuche oder Bemessung mit Berechnungsmodellen wie sie im Eurocode zu finden sind, durchzuführen. Die notwendige Klassifizierung auf Basis von Versuchen erfolgt nach EN 13501-2 [7]. Nachdem die Nachweisführung nach Eurocode, d.h. entsprechend der dort verfügbaren Berechnungsmodelle, charakteristische Materialkennwerte für die Beschreibung der Steifigkeits- und Festigkeiten verwendet, ist generell zu erwarten, dass Brandversuche zu optimistischeren Ergebnissen führen als die entsprechende Bemessung mittels Bemessungsverfahren [8].

Insbesondere für Holzbauteile, bei denen ein signifikanter Unterschied zwischen den charakteristischen Werten und der Mittelwerte zu erwarten ist, sollte dieser Umstand entsprechend berücksichtigt werden, siehe Kapitel 6.

## 2. Bemessung von Holzbauteilen im Brandfall

Seit der Einführung von Eurocode 5, EN 1995-1-2 [1], gibt es in Europa ein einheitliches Bemessungsverfahren für Holzbauteile. Die Berechnungsmethode ermöglicht die Herleitung des Tragwiderstandes von Holzbauteilen in zwei Schritten.

- Im ersten Schritt kann gemäß einem Abbrandmodell der unverkohlte Querschnitt zu jedem beliebigen Zeitpunkt berechnet werden; Ergebnis ist ein verbleibender Restquerschnitt. Das Modell berücksichtigt die Querschnittsgeometrie, die Produktart (z.B. Vollholz oder Brettschichtholz) sowie das Vorhandensein von ev. Brandschutzbekleidungen (z.B. Gipsplatten).
- Im zweiten Schritt wird aus dem Restquerschnitt ein wirksamer Querschnitt berechnet, der Materialeigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit) wie bei Normaltemperatur aufweist. Hierfür wird vom Restquerschnitt eine fiktive Schicht abgezogen, welche die sich durch die Erwärmung des verbliebenen Restquerschnittes ergebenden Festigkeits- und Steifigkeitsverluste kompensieren kann. Der um diese Kompensationsschicht verminderte Restquerschnitt kann als effektiver Querschnitt bezeichnet werden. Daher wird zukünftig von der Methode des effektiven Querschnitts gesprochen während in der aktuellen deutschen Fassung von EN 1995-1-2 [1] von ideellen Querschnitten gesprochen wird.

Die in EN 1995-1-2 [1] angegebene alternative Methode mit reduzierten Eigenschaften erweist sich insbesondere für BSP als nicht anwendbar, da kein brandausgesetzter (geometrischer) Umfang angegeben werden kann. Diese Methode wird auch deshalb in der zukünftigen Fassung von EN 1995-1-2 [1] nicht mehr erwähnt werden.

## 3. Modell für Abbrand von Holz

Holz ist ein brennbares Baumaterial und unterscheidet sich damit von den meisten anderen verwendeten Baustoffen. Wenn ausreichend Wärmeenergie auf die Holzoberfläche aufgebracht wird, kommt es zur Pyrolyse. Folglich wird eine Kohleschicht gebildet, welche im Brandfall weiter der Hitzeeinwirkung ausgesetzt wird. Holz ist bekanntlich ein schlechter Wärmeleiter (Wärmeleitfähigkeit  $\lambda \approx 0.1 \text{ W/mK}^{-1}$ ), die im Brandfall gebildete Kohleschicht weist aber durch die abnehmende Dichte (zunehmende Porosität) noch bessere Wärmedämmeigenschaften auf und schützt damit den unverkohlten Restquerschnitt gegen einfallende Hitze. Diese Eigenschaften erklären die geringen Temperaturen im Kern eines Holzquerschnittes, welche das günstige Tragverhalten im Brandfall begründen. Während bei Stahlbauteilen von homogenen Temperaturen ausgegangen wird, können bei ungeschützten Holzbauteilen ab einer Tiefe von ca. 40 mm hinter der Abbrandgrenze (Tiefe der Kohleschicht) Normaltemperaturen gemessen werden [10][11][12].

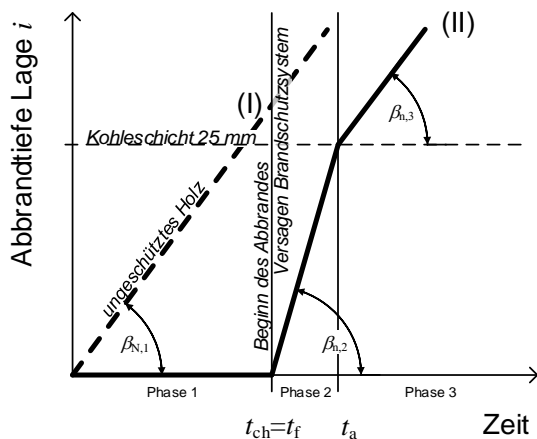
Angeordnete Brandschutzsysteme wie Brandschutzbekleidungen können einerseits die Wärmeenergie, welche auf die Holzoberfläche auftritt infolge ihrer Dämmwirkung, reduzieren (mineralische Bekleidungen, aufschäumende Oberflächenbeschichtung), oder durch das Verdampfen von darin enthaltenem Wasser nachhaltig verzögern (gipsbasierte Bekleidungen). Für Holzoberflächen, welche ungeschützt der Normbrandeinwirkung ausgesetzt sind, können in der Regel konstante Abbrandraten beobachtet werden, welche auch Eingang in das gegenständliche Modell finden [1][11].

Obwohl in Forschungsarbeiten unter Normbrand eine Abhängigkeit der Abbrandrate von der Dichte und der Feuchte nachgewiesen wurde, wird vereinfacht von einem Bemessungsgrundwert der Abbrandrate für Bauholz (Nadelholz) von  $\beta_0 = 0.65 \text{ mm/min}$  ausgegangen [1]. Dieser Grundwert ergibt sich aus unzähligen Messungen unter Normbrandbedingungen [11]. Je nach Produkt, Ausführung und Kombination mit passiven Brandschutzsystemen

(siehe Abb. 2) können verschiedene Faktoren den Bemessungsgrundwert  $\beta_0$  für die Abbrandrate vermindern oder erhöhen, sie sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die allgemeine Gleichung (1) für die Berechnung wurde kürzlich vorgestellt [15]:

$$\beta_n = k_s \cdot k_{pr} \cdot k_n \cdot k_g \cdot k_{cr} \cdot k_j \cdot k_{co} \cdot \beta_0 \quad (1)$$

Während ein Großteil der angegebenen Ausdrücke bereits heute in EN 1995-1-2 [1] in verschiedenen Abschnitten eingeführt ist, stellt der hier präsentierte Ansatz eine ganzheitliche Beschreibung dar, die flexibel in Zukunft auch für neue Anwendungen angepasst und erweitert werden kann.



Legende:

$\beta_{n,1}$  Bemessungswert der ideellen Abbrandrate in Phase 1

Anmerkung: für ungeschützte Holzbauteile; für geschützte Holzbauteile gilt  $\beta_{n,1} = 0$

$\beta_{n,2}$  Bemessungswert der ideellen Abbrandrate in Phase 2

$\beta_{n,3}$  Bemessungswert der ideellen Abbrandrate in Phase 3

$t_{ch}$  Beginn des Abbrandes

$t_f$  Versagenszeit des Brandschutzsystems (Brandschutzbekleidung)

$t_a$  Zeitpunkt zu der eine 25 mm starke Kohleschicht erreicht ist

Abbildung 2: Allgemeine Beschreibung des Abbrandes von ungeschützten (I) und anfänglich geschützten Holzbauteilen (II) nach EN 1995-1-2 [1], modifiziert übernommen von [15].

Phase 1 in Abb. 2 beschreibt jene Phase, in der das aktuelle Brandschutzsystem, zB. Eine Gipsplatte, den Beginn des Abbrandes verzögern kann. Es muss darauf hingewiesen werden, dass der Holzquerschnitt in dieser Phase jedoch bereits eine Erwärmung erfährt, welche zu einer Verminderung der Materialeigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit) führt. Diese Phase endet mit dem Beginn des Abbrandes  $t_{ch}$ , welcher entweder hinter der Bekleidung stattfindet, oder gleichzeitig mit dem Versagen der Bekleidung zum Zeitpunkt  $t_f$  einsetzt. Im Fall von Holz- oder Holzwerkstoffplatten als Bekleidung aber auch bei Verwendung von normalen Gipsplatten, fallen diese beiden Zeitpunkte zusammen.

In der aktuellen Version von EN 1995-1-2 [1] ist bereits ein Faktor eingeführt, mit dem ein Versagen von Bekleidungen berücksichtigt wird: Der Faktor  $k_2 = 2$  beschreibt in Phase 2 eine doppelte Abbrandrate, um das Nichtvorhandensein einer schützenden Holzkohleschicht, bei gleichzeitig bereits hohen Temperaturen im Brandraum zu berücksichtigen. Das Modell geht davon aus, dass sich nach der schnellen Bildung einer ausreichend dämmfähigen Kohleschicht von 25 mm wieder die ursprüngliche ideale Abbrandrate (gestrichelte Linie in Abb. 2) einstellt. Dieses Modell kann für die Beschreibung des Abbrandes für anfänglich geschützte massive Holzquerschnitte aber auch für BSP verwendet werden [24].

Tabelle 1: Faktoren zur Herleitung des Bemessungswertes der Abbrandrate  $\beta_n$  [15].

Faktor	Bezeichnung	Erklärung	Quelle
$k_s$	Querschnittsfaktor	Berücksichtigt den Einfluss der überlagernden Wärmeströme für schmalere Querschnitte ( $b < 180$ mm). In der Regel betrifft dieser Faktor nur die einseitig brandbeanspruchte Schmalseite von Bauteilen (Ständer, Rippen in gedämmten Wand- und Deckenkonstruktionen).  $k_s = \begin{cases} 1,2 & \text{für } 40\text{mm} \leq b \leq 60\text{ mm} \\ 1,3 - 0,00167 \cdot b & \text{für } 60\text{mm} \leq b \leq 180\text{ mm} \\ 1,0 & \text{für } b \geq 180\text{ mm} \end{cases}$	[16]
$k_{pr}$	Schutzfaktor	Berücksichtigt den veränderten Abbrand hinter einem Brandschutzsystem (Bekleidung). In [1] werden einige generische Werte für $k_{pr}$ angegeben, in Zukunft können produktspezifische Werte nach EN 13381-7 [17] bestimmt werden.	[1] [16] [17] [18]
$k_n$	Kantenrundungsfaktor	Berücksichtigen den erhöhten Abbrand in der Nähe von Kanten, Spalten (Abstände zwischen Lamellen in BSP) oder Rissen. In der Realität tritt in diesen Fällen ein mehrdimensionaler Abbrand auf, wird aber mittels dieser Faktoren auf einen eindimensionalen Abbrand umgerechnet, um eine einfache Handhabung zu ermöglichen.	[19] [20]
$k_g$	Spaltenfaktor		[8] [21]
$k_{cr}$	Rissfaktor		[22]
$k_j$	Fugenfaktor	Berücksichtigt den Einfluss von nicht hinterlegten Fugen von Bekleidungen auf die Brandabschnittsbildung (EI). Für hinterlegte Fugen von Bekleidungen kann $k_j = 1.0$ angenommen werden.	[8]
$k_{co}$	Verbindungsfaktor	Berücksichtigt den erhöhten Abbrand aufgrund von metallischen Teilen bzw. Verbindungsmitteln, welche insbesondere bei Verbindungen mit innenliegenden Stahlblechen beobachtet werden kann.	[23][22]

## 4. Modell für Abbrand von BSP

Unter Berücksichtigung produkttypischer Eigenschaften von BSP welche in einer großen Anzahl Brandversuchen ermittelt wurden [25], kann das Modell von EN 1995-1-2 [1] auch für BSP verwendet werden. Aufgrund des lagenartigen Aufbaus und der damit einhergehenden Verklebung, kann der Abbrand von BSP von jenem homogener Produkte abweichen. Hierbei muss der Lage Klebfugen sowie dem Klebstoff selbst besondere Beachtung geschenkt werden, siehe Kapitel 6. Die Berechnung des Restquerschnittes sollte die Ausrichtung der BSP Elemente berücksichtigen, d.h. ob diese horizontal (Deckenelement) oder vertikal (Wandelement) ausgerichtet sind.

Um den Restquerschnitt bzw. die Abbrandtiefe zu bestimmen, sollten folgende Parameter berücksichtigt werden:

- Wenn verkohlte Lagen des BSP an unverkohlttem Holz anhaften (Eigenschaft «Anheftung», siehe Normenreihe EN 13381-X [17]) und damit die Kohleschicht den Restquerschnitt zu schützen vermag, verhält sich das Produkt wie ein Vollholzprodukt.
- Wenn mit einer Anheftung der verkohlten Lagen des BSP an dem unverkohltten Restquerschnitt nicht gerechnet werden kann, muss angenommen werden, dass das Produkt zeitweise die schützende Wirkung der Kohleschicht verliert. Folglich muss ein erhöhter Abbrand in der nachfolgenden Lage berücksichtigt werden, bis wieder eine Kohleschicht gebildet werden konnte, die den BSP Restquerschnitt vor hohen Temperaturen im Brandraum schützen kann. Dieses Phänomen gleicht jenem von Holzbauteilen, welche anfangs von Bekleidungen geschützt werden, siehe Abb. 2.



Für vertikal ausgerichtete BSP (Wandelemente) wurde in den durchgeführten Versuchen der Verlust der Anheftung von verkohltem Lagen weniger ausgeprägt festgestellt. Allerdings sollten ungeschützte (BSP ohne Brandschutzsystem) tragende Wandelemente mit mindestens fünf Lagen vorgesehen werden, um eine robuste Tragstruktur zu gewährleisten.

Generell sollte sichergestellt werden, dass der BSP Restquerschnitt über eine rechnerische minimale Reststärke der äußeren Lage in Spannrichtung von mindestens 3 mm aufweist [3] [15] [26]. Aufgrund des vorgestellten Verhaltens von BSP im Brandfall kann festgehalten werden, dass der Lagenstärke von BSP eine hohe Bedeutung zukommt. Eine starke äußere Lage ist in der Regel von Vorteil, da in diesem Fall der mehrlagige Aufbau von BSP nur einen geringen Einfluss in der Brandbemessung hat, es kann kein Einfluss des Klebstoffes auftreten. Eine Dimensionierung des Produktes mit einer Lage entsprechender Stärke sollte darauf abzielen, dass die erste Lage erst nach ca. 45-60 Minuten Brandeinwirkung vollständig verkohlt ist.

Für die Berechnung des Abbrandes müssen weitere produktspezifische Parameter wie die Anordnung von Abständen zwischen den Lamellen in den Querlagen (Spalten) berücksichtigt werden. Verschiedene Fälle A bis C des Modelles für den Abbrand von BSP sind in Abb. 3 gegeben. Für Spalten bis zu 2 mm muss der Bemessungsgrundwert der Abbrandrate  $\beta_0$  nicht weiter erhöht werden, während für Spalten zwischen 2 und 6 mm der erhöhte Spaltenfaktor von  $k_g = 1.2$  zu verwenden ist [8]. Für Spalten über 6 mm muss der Abbrand der Lamellen als dreiseitig angenommen werden. Eine Beschreibung des Restquerschnittes für diese Produkte mit einfachen Berechnungsverfahren ist nicht mehr möglich und es müsste für diese Produkte auf andere Methoden zurückgegriffen werden, zum Beispiel Versuche oder thermische Simulationen mit der Methode der finiten Elemente. Es sollte hierbei auch Erwähnung finden, dass die Anordnung von Spalten in Quer- und Längslagen zu undefinierten Randbedingungen führen würde, bei der mit einer Brandausbreitung durch das BSP Element hindurch zu rechnen ist. Für Längs- und Querlagen mit aneinandergesetzten oder an der Schmalseite miteinander verklebten Lamellen wird  $k_g = 1.0$  angenommen. Die generelle Gleichung (1) verfügt damit über zwei Faktoren welche für die Herleitung der ideellen Abbrandrate  $\beta_n$  für BSP herangezogen werden müssen, d.h.  $k_i \neq 1.0$ , diese sind:

- $k_{pr}$  Faktor zur Berücksichtigung des angebrachten Brandschutzsystems, d.h. der Bekleidung (Schutzfaktor)
- $k_g$  Faktor zur Berücksichtigung der Zwischenräume in den Querlagen (Spaltenfaktor)

An dieser Stelle sollte hervorgehoben werden, dass in Abhängigkeit vom vorliegenden Produkt der ideelle Abbrand  $\beta_{n,i}$  gegebenenfalls für jede Lage  $i$  individuell berechnet werden muss. Abb. 3 zeigt die Berechnungswege für Decken- und Wandelemente aus BSP zur Ermittlung des Restquerschnittes. Sowohl für Decken- als auch Wandelemente kann es notwendig sein, ein Versagen der Anheftung der Brettlagen zu berücksichtigen (Abfallen verkohlter Schichten). Unterschiedlich hierbei ist jedoch die Ausprägung dieser Eigenschaft, womit die drei Berechnungsfälle A bis C in Abb. 5 gegeben sind. Ein Vergleich zwischen dem vorgestellten Modell und der Auswertung von Brandversuchen zeigt, dass das Modell ausreichend genau in der Lage ist, die vorgestellten Phänomene zu beschreiben, siehe Abb. 4.

Ob ein Abfallen der verkohlten Lagen auftritt, hängt nicht nur von dem verwendeten Klebstoff und der der Güte der erreichten Verbindung in der Klebfuge ab, sondern auch von dem Aufbau des BSP Produktes (Dicke der Lagen).

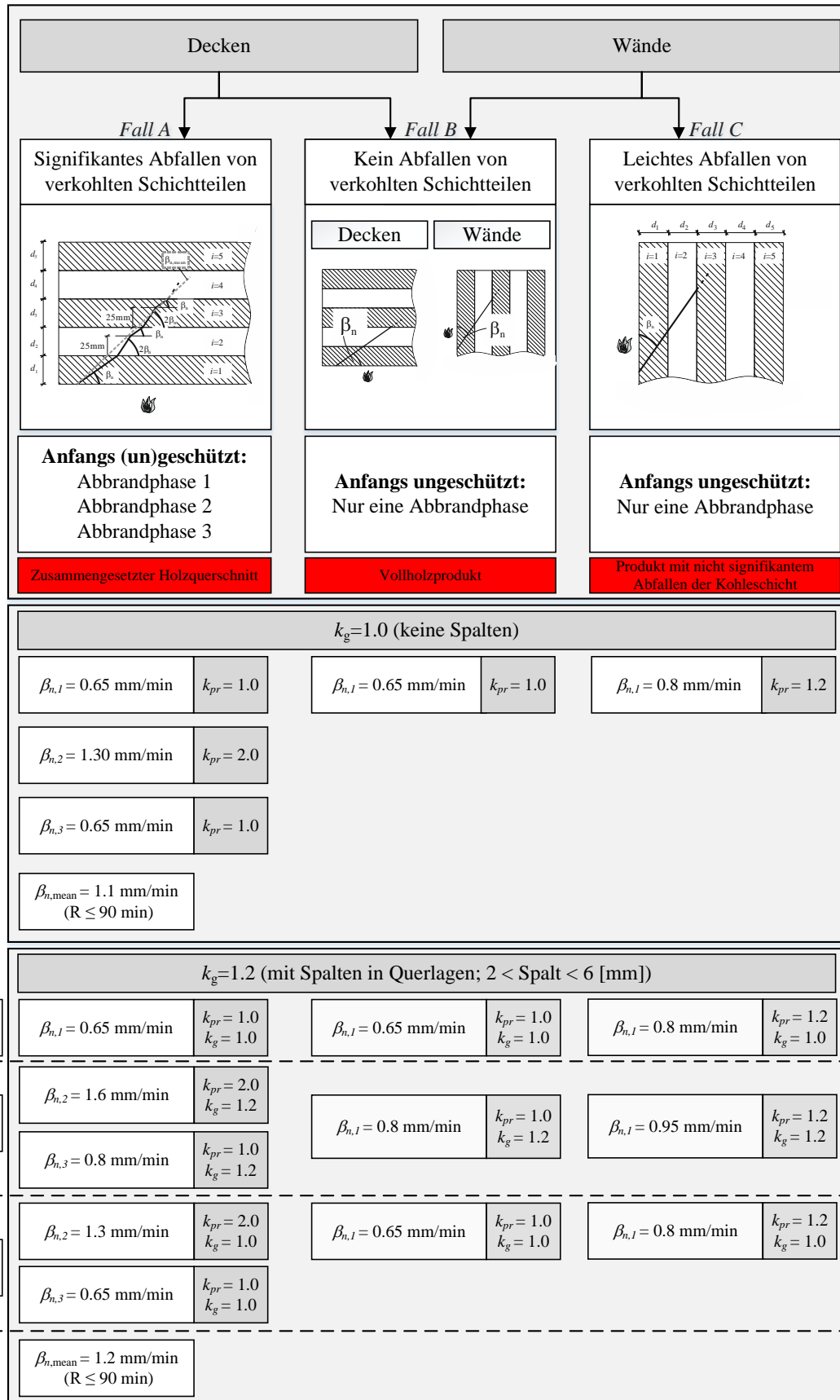


Abbildung 3: Fallunterscheidung von Abbrandraten für verschiedene Typen BSP (ohne Bekleidung) [15].

Es sollte jedoch deutlich darauf hingewiesen werden, dass der Feuerwiderstand nicht allein aus der Abbrandtiefe abzuleiten ist, sondern auch der produkttypische Aufbau mit den Querlagen, welche sehr geringen Festigkeiten in Längsrichtung aufweisen, zu berücksichtigen ist. Beispiele zur Brandbemessung von handelsüblichen BSP-Deckenelementen in [25] konnten zeigen, dass die Brandbemessung bei der Mehrzahl von handelsüblichen BSP-Elementen trotz ablösender verkohlter Lagen zu keiner Veränderung des Lagenaufbaus bzw. der Gesamtstärke des BSP-Elementes bei Decken aufgrund der Brandbemessung führt (Tragfähigkeitsnachweis), der Lagenaufbau ergibt sich vielmehr oft durch Nachweise bei Normaltemperatur (Schwingung, Durchbiegung, etc.) [28].

Soll anstatt des Stufenmodelles ein konstanter Abbrand über 90min angesetzt werden kann für Produkte mit bis zu 6 mm Spalten  $\beta_{n,mean} = 1.20$  mm/min angegeben werden. Im aktuellen Vorschlag der prDIN 20000-8 [29] wird für die vereinfachte Berechnung des Abbrandes abweichend von den hier präsentierten Erkenntnissen ein deutlich niedriger Wert von  $\beta_{n,mean} = 0.80$  mm/min angegeben.

Neben dem Brandverhalten sind in der aktuellen Fassung der prEN 16351 [2] weitere Angaben zum Tragwiderstand im Brandfall angegeben. Der Ansatz den Abbrand gemäss der vorliegenden Dichten der Lamellen zu berechnen wird als nicht zielführend beurteilt da die Verwendung von Berechnungsmodellen für den Abbrand auf Grundlage der Dichte einerseits umstritten sind [11][13][22], dies der Vereinfachung der Rechenregeln widerspricht, die Dichte eine hochgradig variable Grösse ist und eine individuelle Anpassung die Berechnungen den Komplexitätsgrad erhöhen würde.

## 5. Tragfähigkeitsbemessung

Hohe Temperaturen, reduzieren die Querschnittshöhe als auch die Materialeigenschaften des erwärmten Holzes im Restquerschnitt selbst. Die aktuelle Version von EN 1995-1-2 [1] gibt keine spezifischen Informationen über die Brandbemessung von BSP an. Grundsätzlich bleiben für die Bemessung nach EN 1995-1-2 [1] zwei Berechnungsmethoden für plattenförmige Bauelemente wie Brettstapel- oder Brettsperrholz. Es sind dies die (1) Methode des effektiven Querschnittes und die (2) erweiterten Berechnungsmethoden (Annex B). Das Konzept von (2) wird hier nicht weiter behandelt.

Die zweistufige Methode (1) (siehe Kapitel 2) sieht (i) eine Verminderung des Restquerschnittes zu einem beliebigen Zeitpunkt der Brandbelastung und um (ii) eine sogenannte Kompensationsschicht, die  $d_0$ -Schicht mit einer Stärke  $d_0$ , vor. Diese Schicht kompensiert die Veränderung der mechanischen Eigenschaften im Bereich zwischen Normaltemperatur und der Temperatur, bei der keine Festigkeit mehr vorhanden ist (300°C) [18]. Aufgrund des produkttypischen Aufbaus mit Quer- und Längslagen zeigt BSP eine wesentlich komplexere Veränderung des Tragverhaltens als Vollholz wenn es einer Brandbelastung ausgesetzt wird. Wie auch bei Normaltemperatur hängen die mechanischen Eigenschaften von BSP stark von Stärke und Festigkeiten der Lamellen in Längsrichtung und der Stärke der Querlagen ab. Es wird in tragende und nichttragende Lagen unterschieden, wenn auch von einer ausreichenden Übertragung von Schubkräften der Querlagen ausgegangen wird [3]. Ungeachtet des Lagenaufbaues verhält sich BSP thermisch wie Vollholz. Das heißt, die temperaturbeeinflusste Tiefe hinter der Abbrandgrenze (Tiefe, in der die Temperatur von 300 auf 20°C fällt) ist nach ca. 20 Minuten Brandeinwirkung in etwa konstant und kann, für ungeschützte BSP Elemente, mit ca. 35 bis 40 mm angegeben werden.

Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Lagen in Spannrichtung haben grundlegende Konsequenzen für die Bestimmung der  $d_0$ -Schicht wie das in Abb. 5 gezeigt wird:

- a) Die Grenze des Restquerschnittes liegt in einer Querlage, die  $d_0$ -Schicht liegt zur Gänze in dieser; die Berechnung des Tragwiderstandes wird von ihr nicht beeinflusst.
- b) Die Grenze des Restquerschnittes liegt in einer Längslage, die  $d_0$ -Schicht liegt zur Gänze in dieser; die Berechnung des Tragwiderstandes wird von ihr beeinflusst.

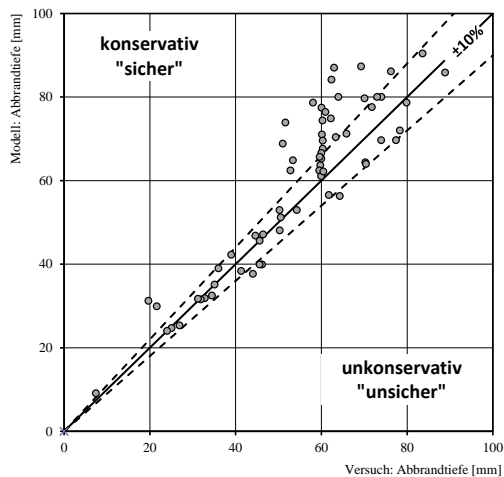


Abbildung 4: Vergleich des Abbrandmodelles mit Versuchen, modifiziert übernommen aus [27].

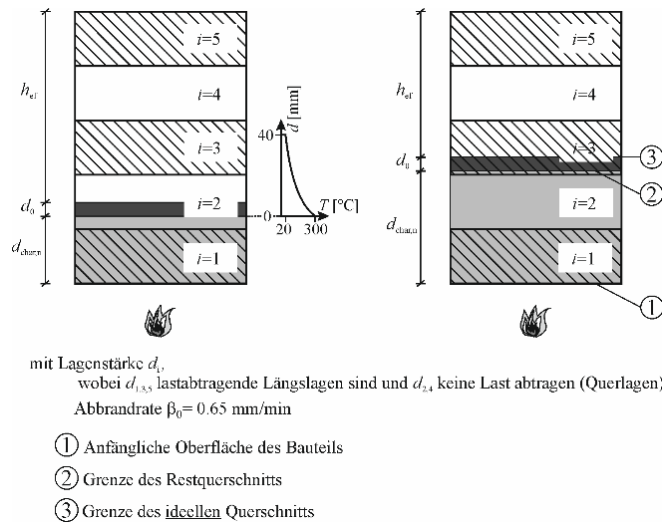


Abbildung 5: Definition des Restquerschnittes und des effektiven Querschnittes: Grenze des effektiven Querschnittes a) in der Querlage und b) in der Längslage [15].

Im Fall a) wird zwar die Querschnittshöhe des effektiven Querschnittes durch die  $d_0$ -Schicht reduziert, aufgrund der Faserrichtung und limitierten Breite der Lamellen wird die Berechnung der Tragfähigkeit des Restquerschnittes aber nicht beeinflusst. Dem widerspricht die Tiefe der temperaturbeeinflussten Tiefe, abgebildet rechts neben dem Querschnitt in Abb. 5. Sie erreicht bereits die folgende (lastabtragende) Längslage. Ziel der Kompensationsschicht  $d_0$  ist es jedoch, die Festigkeits- und Steifigkeitsminderungen durch Temperaturbeanspruchung entsprechend zu kompensieren. Im Fall a) ist demnach davon auszugehen, dass die abgebildete  $d_0$ -Schicht nicht in der Lage ist, die tatsächliche Tragfähigkeit zu beschreiben. Im Fall b) reduziert die  $d_0$ -Schicht den effektiven Querschnitt und beeinflusst wie bei Vollholz die Berechnung der Tragfähigkeit des Restquerschnittes. In der Realität kann es selbstverständlich zur Kombination beider Fälle a) und b) über die Zeitdauer der Brandeinwirkung kommen. Fall a) und b), sowie weitere mögliche Kombinationen, welche sich aus dem Abbrand und der Überlagerung mit den Temperaturprofilen ergeben, erklären, warum es in der Regel nicht möglich ist, das Tragverhalten von BSP Produkten im Brandfall mit einem konstanten Wert für die Stärke  $d_0$ -Schicht abzubilden. Während entsprechend EN 1995-1-2 [1], ausgehend von der Beschreibung des Biege widerstandes von BSH-Trägern im Brandfall bis zu 60 min, von einem konstanten Wert für  $d_0$  ausgegangen wird, kann für große Anzahl an unterschiedlich aufgebauten BSP-Elementen keine einfache Lösung angeboten werden, da dies in der Regel entweder zu einer Über- oder Unterschätzung der Tragfähigkeit des Restquerschnittes führt. Das Europäische Handbuch «Fire Safety in Timber Buildings» [8] führt daher einfache Funktionen für  $d_0$  ein (die darin angegebenen Regeln für  $s_0$  entsprechen jenen für  $d_0$ ). Um dem umfangreichen Produktportfolio von BSP zu begegnen, wurden weitere verschiedene Ansätze für drei-, fünf- und siebenlagige BSP Elemente angegeben. Darüber hinaus wird in Wand- und Deckenelemente unterschieden, um das grundlegend verschiedene mechanische Verhalten (Knicken vs. Biegung) korrekt wiederzugeben und um eine unökonomische Überdimensionierung in vielen Fällen zu vermeiden. Die Werte für die Kompensationsschicht sind entweder mit Konstanten oder einfachen Gleichungen in Abhängigkeit von der Stärke des BSP Elementes angegeben. Die in dem Handbuch angegebenen Werte wurden basierend auf einer umfangreichen Studie entwickelt, welche auf Simulationen beruht, die mit Hilfe einer Vielzahl von Versuchen verifiziert wurden [3]. Für eine Vielzahl von Produkten ist der Wert  $d_0$  oft größer als 7 mm welche in EN 1995-1-2 [2] für Balken und Stützen eingeführt werden. Um die große Streuung der Ergebnisse zu reduzieren, wurden Gleichungen für verschiedene Belastungs- und Anwendungsfälle hergeleitet. Die resultierenden Gleichungen, vorgestellt in [8], folgen im Mittel Simulationsergebnissen, welche durch Versuche abgesichert wurden. Es wurde erkannt, dass die Ergebnisse optimiert werden

könnten (Einschränkung der Streuung der Resultate), wenn eine Einschränkung des Produktportfolios eine gezieltere Beschreibung des Tragverhaltens im Brandfall ermöglichen würde.

Ein eventuell auftretendes Abfallen von Teilen der Kohleschicht oder der Kohleschicht im Ganzen bedarf daher keiner weiteren Bemessungsregeln für eine Anpassung von  $d_0$ -Wert, da dieser mit einem sprunghaft steileren Temperaturgradienten geringer wird.

## 6. Brandversuche mit BSP

Um Ergebnisse von Brandversuchen wissenschaftlich auswerten zu können, müssen – je nach Zielsetzung und Material – verschiedene Kriterien erfüllt werden. Die Herleitung von  $d_0$  Werten bei holzwerkstoffbasierten strukturellen Bauteilen wurde in [32] genau beschrieben und sei hier für BSP angepasst kurz zusammengefasst:

- 1) Die Tragfähigkeit des geprüften Elementes muss vor dem belasteten Brandversuch hinreichend genau bestimmt worden sein. Die alleinige Annahme der Festigkeit aus Festigkeitsklassen ist nicht ausreichend.
- 2) Im Brandversuch führen die Auflagerbedingungen zu einem definierten statischen System um eine Rückrechnung von  $d_0$  zu ermöglichen.
- 3) Der Brandversuch wird unter einer bestimmten Belastung (relativ zur erwarteten Tragfähigkeit) bis zum Versagen durchgeführt. Ein Abbruch des Versuches bei Erreichen eines Feuerwiderstandes (z.B. 90 Minuten) lassen keine Rückschlüsse auf die zu erwartende Versagenszeit führen.
- 4) Der Abbrand bzw. der Restquerschnitt bei Versagen wird ausreichend genau dokumentiert. Dies bedingt ein schnelles Ablöschen von Brand- und Glutnestern nach dem Abbruch des Brandversuchs.

Während die oben angeführten vier Grundsätze die Rückrechnung von  $d_0$  ermöglichen, müssen für die Entwicklung des Modells zur Beschreibung des Abbrandes andere Maßnahmen getroffen werden:

- 5) Der Abbrand muss durch Thermoelemente verfolgt werden, welche in genau definierten Tiefen angeordnet sind. Da bei BSP die Temperatur insbesondere in Klebefugen bewertet werden muss, müssen die Thermoelemente in eben jenen bereits in der Produktionsphase eingelegt werden.
- 6) Bei der Installation von Thermoelementen sind Grundsätze der Wärmeleitung und der Messtechnik zu berücksichtigen. Die Einbettungslänge (Länge des Kabels parallel zur erwartenden Isotherme) ist entsprechend lang (mind. ca. 50 mm) zu wählen [36].
- 7) Aufgrund der möglichen Einflüsse der Stärke der Lagen können Ergebnisse, welche aus zeitlich begrenzten Versuchen gewonnen wurden, nicht beliebig extrapoliert werden.

## 7. Danksagung

Die Verfasser möchten den COST Actions FP1402 und FP1404 für die Unterstützung danken. Viele Herausforderungen konnten bereits International diskutiert werden [8], eine enge Zusammenarbeit zwischen Industrie, Forschung und Normung konnte als wichtige Basis für weitere Entwicklungen geschaffen werden.

## 8. Literatur

- [1] EN 1995-1-2: 2004, Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall, Europäische Norm. European Committee for Standardization, Brüssel, 2004.
- [2] prEN 16351, Holzbauwerke - Brettsperrholz – Anforderungen, 2015.
- [3] J. Schmid, J. König, Cross-laminated timber in fire, SP Report 2010:11, Stockholm, 2010.
- [4] Bauproduktenverordnung, Richtliniennummer 305/2011 (EU).
- [5] EN 13501-1, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, 2010.
- [6] L. Tsantaridis, B. Östman, T. Hakkarainen, Euroclass predictions for developing wood based products with improved fire performance. Proceedings Interflam 2010, 419-428, Interscience Communications, 2010
- [7] EN 13501-2, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen, 2015.
- [8] B. Östman et al., Fire safety in timber buildings - Technical guideline for Europe, SP Report 2010:19, 2010.
- [9] P. Thoft-Christensen, M. J. Baker, Structural reliability theory and its applications, Springer Verlag, 1982.
- [10] M. L. Janssens, R. H. White, Short Communication: Temperature Profiles in Wood Members Exposed to Fire, Fire and Materials, vol 18, pp. 263-265, 1994.
- [11] A. Frangi, and M. Fontana, Charring rates and temperature profiles of wood sections." Fire and Materials, 2003.
- [12] J. Schmid, J. König, A. Just, The Reduced Cross-Section Method for the Design of Timber Structures Exposed to Fire – Background, Limitations and New Developments, Structural Engineering International, Volume 22, Number 4, November 2012, pp. 514-522(9).
- [13] J. König, D. Rydholm, Small-scale fire tests of heavy timber components, Swedish Institute for Wood Technology Research. Report P 0310036, Stockholm, 2003.
- [14] J. König, J. Schmid, Bonded timber deck plates in fire" Proc., CIB-W18-40th Meeting, Bled, Slovakia, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, 2007.
- [15] A. Falk, Ph. Dietsch, J. Schmid (editors), Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings, Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404, Stockholm, ISBN 978-91-799-043-8, 2016.
- [16] A. Frangi, J. König, Effect of increased charring on the narrow side of rectangular timber cross-sections exposed to fire on three or four sides, Fire and Materials 2011; 35(8): 593–605.
- [17] prEN 13381-7, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 7: Brandschutzmaßnahmen für Holzbauteile, 2016.
- [18] J. König, Structural fire design according to Eurocode 5 - Design rules and their background, Fire and Materials; 29: 147–163, 2005.
- [19] W. J. B. Ollis, M. Partl, H. Strassler, Standard Tests and Calculation of Fire Resistance in timber, Munich. Eng. 145 (June 14, 1968):1213. 16. 1977.

- [20] J. König, Fire resistance of timber joists and load bearing wall frames", Swedish Inst. for Wood Technology, Research. Report I 9412071, Stockholm, 1995.
- [21] J. Fornater, K. Bergmeister, G. Hochreiner, Versuchsbericht – Kleinbrandversuchsreihe 2. Teil 1 KBV 2/1 – Versuche mit Rissen, Universität für Bodenkultur, Institut für konstruktiven Ingenieurbau. Wien, 2001.
- [22] J. König, L. Walleij, One-dimensional char-ring of timber exposed to standard and parametric fires in initially protected and non-protected fire situations, Trätekt – Swedish Institute for Wood Technology Research, Report No. I 9908029, 1999.
- [23] C. D. Erchinger, Zum Verhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall, PhD thesis, ETH Zurich, vdf Hochschulverlag. Zurich, Switzerland, 2009.
- [24] A. Frangi, M. Fontana, E. Hugli, R. Jöbstl, Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire, *Fire Safety Journal*, 44, S. 1078-1087, 2009.
- [25] M. Klippel, C. Leyder, A. Frangi, M. Fontana, F. Lam, A. Ceccotti, Fire tests on Loaded Cross-Laminated Timber Wall and Floor Elements. In *Fire Safety Science - Proceedings of the 11th international Symposium*, Christchurch, New Zealand, 2014.
- [26] J. Schmid, A. Menis, M. Fragiaco, I. Clemente, G. Bochicchio, Behaviour of Loaded Cross-Laminated Timber Wall Elements in Fire Conditions, *Fire technology*, July 2015.
- [27] M. Klippel, J. Schmid, Design of cross-laminated timber in fire, *Structural Engineering International*, 2017.
- [28] M. Klippel, A. Frangi, Brandverhalten von Brettsperrholz. *Bautechnik*, 93: 567–573. doi:10.1002/bate.201500070, 2016.
- [29] prDIN 20000-8, Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 8: Brettsperrholz für tragende Zwecke nach DIN EN 16351, 2016.
- [30] EN 1365-1, Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 1: Wände, 2013.
- [31] Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 2: Decken und Dächer, 2015.
- [32] J. Schmid, A. Just, M. Klippel, M. Fragiaco, The Reduced Cross-Section Method for Evaluation of the Fire Resistance of Timber Members: Discussion and Determination of the Zero-Strength Layer, *Fire Technology*, 51(6), 2015, 1285-1309.
- [33] J. Schmid, M. Klippel, A. Just, A. Frangi, Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the reduced cross-section method. *Fire Safety Journal*. 2014.
- [34] J. Schmid, M. Klippel, A. Liew, A. Just, A. Frangi, Analysis of Fire Resistance Tests on Timber Members in Compression with Respect to the Reduced Cross-Section Method. *Proceedings of the INTER Meeting Sibenik, Croatia*, 2015.
- [35] EN 1363-1, Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; 2012.
- [36] VDI/VDE-Richtlinie 3511-5, Technische Temperaturmessungen-Einbau von Thermometern, 1994.
- [37] J. Schmid, J. König, and J. Köhler, Fire-exposed cross-laminated timber – modelling and tests, *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, Riva del Garda, Trentino, Italy, 2010.
- [38] A. Menis, Fire Resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-laminated timber elements. PhD thesis, Università degli studi di Cagliari, Italy, 2012.