

# Zukünftige Möglichkeiten zur Brandschutzbemessung nach prEN 1995-1-2

Björn Kampmeier  
Hochschule Magdeburg-Stendal  
Magdeburg, Deutschland



Dirk Hollmann  
Technische Hochschule OWL  
Detmold, Deutschland





# Zukünftige Möglichkeiten zur Brandschutzbemessung nach prEN 1995-1-2

## 1. Einleitung

Nach der Veröffentlichung der Eurocodes im Jahr 2010 haben sich diese inzwischen in der Praxis bewährt, wobei durchaus Optimierungsbedarf festgestellt wurde. Dieser betrifft in erster Linie die Anwenderfreundlichkeit, fehlende Nachweisverfahren für übliche Konstruktionen – insbesondere für Feuerwiderstandsdauern größer 60 Minuten –, sowie andererseits zu viele Nachweisalternativen. Derzeit wird die nächste Generation der Eurocodes erstellt. Nach der Einarbeitung der Kommentare und fachlichen Stellungnahmen des CEN werden derzeit die endgültigen Normen und anschließend die Nationalen Anhänge erarbeitet, die voraussichtlich im Jahr 2027 erscheinen werden und einen Teil der aufgeführten Kritikpunkte beheben sowie den Anwendungsbereich des Holzbaus erweitern sollen.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über zukünftige Änderungen in der brandschutztechnischen Bemessung von Holzbauteilen auf Grundlage der prEN 1995-1-2:2023 [1] gegenüber der DIN EN 1995-1-2: 2010 [2]. Die wesentlichen Änderungen sind:

- Erweiterung der Bemessungsverfahren von 60 auf bis zu 120 Minuten Feuerwiderstandsdauer
- Ersatz der bisherigen Bemessungsverfahren Methode mit reduziertem Querschnitt und Methode mit reduzierten Eigenschaften durch die Methode mit effektivem Querschnitt
- Aufnahme tabellarischer Bemessungsverfahren für ausgewählte Bauteile
- Übernahme bisheriger informativer Anhänge in den Haupttext
- Erweiterung des Bemessungsverfahrens von Holztafelementen mit der Einführung der «separation function method»
- Verbesserung der Nachweisformate für Verbindungsmittel und Detailausbildungen
- Aufnahme besonderer Nachweis für Holzbetonverbundbauteile, Brettsperrholzbauteile, etc.
- Erweiterung der temperaturabhängigen, thermischen Materialgesetze für allgemeine Bemessungsverfahren
- Aufnahme von Anhängen mit Prüfungen zur Ermittlung der Eingangswerte für Bemessungsverfahren

## 2. Grundlagen der Brandschutzbemessung nach Eurocode

### 2.1. Allgemeines

Die Eurocodes bieten grundsätzlich drei gleichwertige Nachweisalternativen zur brandschutztechnischen Bauteilbemessung an. Dies sind die Tabellenbemessung (Stufe 1), vereinfachte Rechenverfahren (Stufe 2) und allgemeine Rechenverfahren (Stufe 3). Mit jeder Stufe steigt die Genauigkeit des Verfahrens, jedoch auch der Rechenaufwand. Für alle drei Nachweisverfahren werden die Einwirkungen baustoffübergreifend in FprEN 1991-1-2:2023 [3] definiert.

### 2.2. Thermische Einwirkungen

Die Feuerwiderstandsfunktionen R (Standicherheit), I (Isolation) und E (Raumabschluss) gemäß DIN EN 13501-2 sind mit der Branddauer entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach FprEN 1991-1-2:2023 verknüpft. Diese nominelle Brandkurve bildet weiterhin für Nachweise von Tragwerken des Hochbaus den Regelfall.

Für Sonderfälle können Bauteile auch auf Basis sogenannter Naturbrandkurven geführt werden. Mit FprEN 1991-1-2:2023; Annex A wird das bisherige Naturbrandmodell punktuell erweitert. Naturbrandmodelle können sowohl für den Nachweis der Standicherheit im Brandfall, für das Temperaturkriterium I oder für den Nachweis einer Brandschutzbekleidung herangezogen werden. Diese müssen dazu komplett durchlaufen werden. Es bleibt jedoch abzuwarten, ob das Naturbrandmodell des Anhangs A über den Nationalen Anhang

zur Anwendung in Deutschland freigegeben wird oder weiterhin in Deutschland ein «eigenes» Naturbrandmodell für die Temperaturen im Brandraum genutzt wird, zumal die bekannten Kritikpunkte des Naturbrandmodells in der FprEN 1991-1-2:2023 nicht behoben wurden. Wenngleich die Anwendung zukünftig in der Praxis zunehmen dürfte, bleibt der Naturbrandnachweis eher die Ausnahme. Daher wird in diesem Beitrag der Focus auf die Nachweise unter ETK-Bedingungen gelegt.

### 2.3. Mechanische Einwirkungen

Die mechanischen Einwirkungen  $E_{d,fi}$  werden zukünftig auf Basis der FprEN 1991-1-2:2023 in Verbindung mit dem dann vorliegenden nationalen Anhang angesetzt. Demnach ist grundsätzlich weiterhin die quasi-ständige Größe zu verwenden. Eine Ausnahme bilden Bauteile, deren führende veränderliche Einwirkung der Wind ist. In diesem Fall ist für die Einwirkung aus Wind die häufige Größe zu verwenden. Eine vereinfachte Ermittlung der mechanischen Einwirkungen erfolgt mit dem Abminderungsfaktor für den Bemessungswert im Brandfall  $\eta_{fi}$ . Dieser beträgt 0,6 bzw. 0,7 im Falle von Nutzlasten der Kategorie E.

Inwiefern bei der neuen Eurocode-Generation von vorstehenden Festlegungen abgewichen wird, ergibt sich schlussendlich erst mit der Erstellung des nationalen Anhangs, wovon aus Sicht der Autoren jedoch nicht auszugehen ist.

### 2.4. Bemessungswerte der Materialeigenschaften

Der Bemessungswert der Festigkeits- bzw. Steifigkeitseigenschaften  $X_{d,fi}$  wird folgendermaßen ermittelt:

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \cdot k_{fi} \cdot X_k / \gamma_{M,fi} \quad (1)$$

$k_{\theta}$  ist ein Abminderungsfaktor für eine temperaturabhängige Steifigkeits- oder Festigkeitseigenschaft und wird im Rahmen des jeweiligen Bemessungsverfahrens genauer definiert.  $k_{fi}$  ist bereits aus der bisherigen Norm bekannt und dient der Umrechnung des charakteristischen Wertes  $X_k$  in die 20%-Fraktile. Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,fi}$  wird mit 1,0 empfohlen und kann im nationalen Anhang noch verändert werden.

In der aktuellen Fassung des Eurocode 5-1-1 werden für die Bauteilbemessung bei Normaltemperatur weitere Beiwerte eingeführt, bspw. der Anpassungsfaktor für die Schubfestigkeit  $k_v$ . Diese werden in der Heißbemessung in der Regel zu 1,0 gesetzt. Thermische Materialeigenschaften, bspw. die Wärmeleitfähigkeiten von Nadelholz oder von Isolationsmaterial, sollen als charakteristische Werte angesetzt werden. Die Tragfähigkeit in der außergewöhnlichen Situation Brand wird dann zum Zeitpunkt  $t$  wie folgt auf Einwirkungsebene nachgewiesen:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi,t} \quad (2)$$

## 3. Materialeigenschaften

### 3.1. Allgemein

In prEN 1995-1-2:2023 werden die grundsätzlichen Materialeigenschaften bzw. die allgemeinen Anforderungen definiert. Dieses betrifft zunächst die jeweils zutreffende europäische Produktnorm *EN* und/oder ein europäisches Bewertungsdokument *EAD*. Weiterhin werden in der Regel Mindestrohndichten  $\rho$  definiert. Beispielsweise werden für kreuzweise verleimtes Brettsperrholz (cross laminated timber *CLT*) EN 16351 und EAD 130005-00-0304 in Verbindung mit einer Mindestrohndichte  $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$  genannt.

Im Bereich der Isolationsmaterialien werden weiterhin Schutzstufen (protection level) anhand verschiedener Rohndichten unterschieden.

Dieses System stellt sicher, dass die den Bemessungskonzepten des Eurocodes zugrundeliegenden thermischen und thermomechanischen Materialeigenschaften innerhalb der zulässigen Grenzbereiche liegen.

### 3.2. Thermische Eigenschaften

Für die Anwendung der allgemeinen Rechenverfahren werden Modelle der temperaturabhängigen, thermischen Materialeigenschaften des Holzes, aber auch von Bekleidungen und Isolierungen benötigt. Dieses sind die Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Rohdichte. Gegenüber dem bisherigen Eurocode werden in prEN 1995-1-2:2023 die Modelle deutlich erweitert, bspw. für Holz, Holzwerkstoffe, Bekleidungen und Gipsbaustoffen und Mineralwollen. Zur Berücksichtigung von physikalischen Effekten wie der Verdunstung von Wasser oder Rissbildungen und Verkohlungen etc. werden die Materialeigenschaften als effektive Kennwerte beschrieben und sind daher nicht mit den bekannten Rechenwerten unter Normaltemperaturbedingungen gleichzusetzen.

Abbildung 1 zeigt die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für Sperrholz mit einer Rohdichte von  $730 \text{ kg/m}^3$  und Mineralwolle mit einer Rohdichte von  $100 \text{ kg/m}^3$ . Mit steigenden Temperaturen nehmen die Werte jeweils deutlich zu. Dieses ist beim Sperrholz insbesondere mit der Rissbildung in der Holzkohle zu erklären und bei der Mineralwolle nimmt die Strahlungsintensität innerhalb des Porenraumes zu.

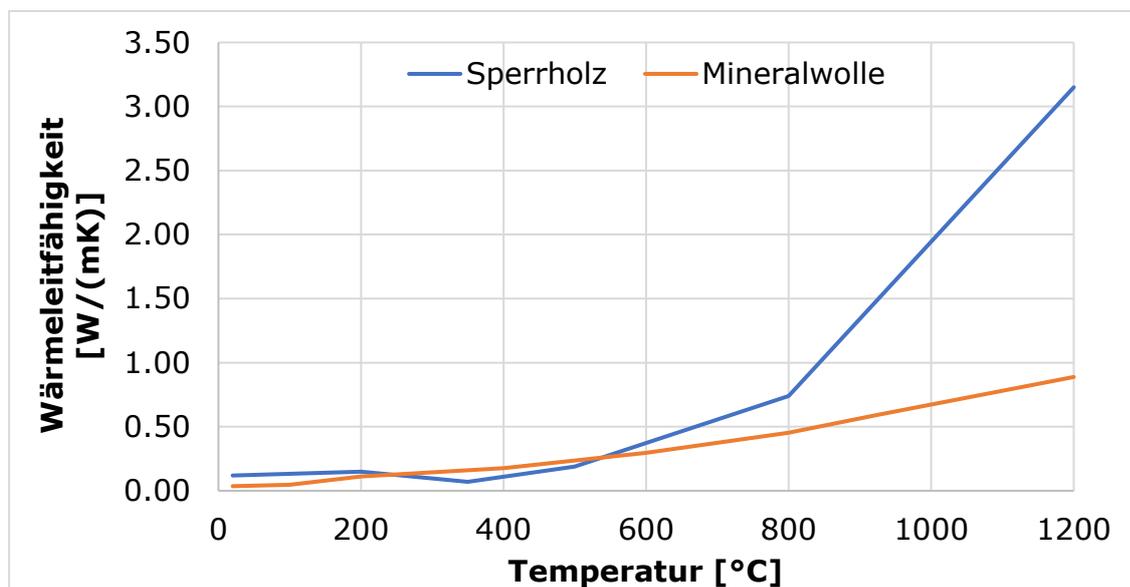


Abbildung 1: Rechenwerte der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Sperrholz ( $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$ ) und Mineralwolle ( $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$ )

### 3.3. Mechanische Eigenschaften

In prEN 1995-1-2:2023 wird in vielen Fällen das Verfahren mit effektivem Restquerschnitt angewandt. Hiermit wird ein Bezug zu den charakteristischen Werten der Materialeigenschaften bei Normaltemperatur hergestellt, da die Festigkeitsreduzierung über eine zusätzliche Querschnittsreduzierung berücksichtigt wird.

Sofern allgemeine Rechenverfahren zur Anwendung kommen, werden die temperaturabhängigen Festigkeiten und Steifigkeiten benötigt. Diese werden normativ als effektive Werte zur Verfügung gestellt und enthalten auch nicht explizit berücksichtigte Effekte, bspw. transientes Kriechen unter Temperatureinwirkung. Die folgende Tabelle enthält entsprechende Reduktionsbeiwerte  $k_{\theta}$  für die wesentlichen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften parallel zur Faserrichtung. Die Werte zeigen eine erkennbar schnellere Entfestigung bei Druck- als bei Zugbeanspruchung, was auf den Aufbau des Holzes zurückzuführen ist. Bei einer Temperatur von  $300 \text{ °C}$  ist kein Beitrag am Lastabtrag mehr vorhanden.

Tabelle 2: temperaturabhängige Reduktionsbeiwerte für die Festigkeit und Steifigkeit von Holz parallel zur Faser

Temp. [°C]	Festigkeit [-]			Steifigkeit (Elastizitätsmodul) [-]		
	Druck	Zug	Schub	Druck	Zug	Schub
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	0,25	0,65	0,4	0,35	0,50	0,40
300	0	0	0	0	0	0

## 4. Tabellarische Bemessungsverfahren

Während die DIN EN 1995-1-2:2010 nur Nachweise der Stufen 2 und 3 kannte, werden mit der prEN 1995-1-2:2023 für ausgewählte Anwendungsfälle die Vorteile der sehr einfach gehaltenen Tabellenbemessung zur Verfügung gestellt. Neben Aufbauten von Konstruktionen werden auch Hilfswerte für die Anwendung des vereinfachten Verfahrens gemäß Stufe 2 zur Verfügung gestellt.

Die nachstehende Aufzählung gibt einen Überblick über die tabellierten Inhalte:

- die Schutzwirkung von Bekleidungen  $t_{ch}$  und  $t_{f,pr}$  (Eingangswerte für europäisches Abbrandmodell),
- Bekleidungen für das Erreichen einer bestimmten Feuerwiderstandsklasse,
- effektive Querschnittshöhe  $h_{ef}$  von Brettsperrholz mit verschiedenen Aufbauten.

Gemäß prEN 1995-1-2 6.1 (3) dürfen im nationalen Anhang weitergehende tabellarische Daten eingeführt werden.

## 5. Vereinfachte Bemessungsverfahren

### 5.1. Europäisches Abbrandmodell

Grundlage der Tragwerksbemessung im Brandfall ist die Berechnung des verbleibenden Restquerschnittes nach dem Abbrand. Für den Nachweis mit vereinfachten Rechenverfahren wird die Dicke der Kohleschicht zukünftig mit dem europäischen Abbrandmodell (european charring model) ermittelt. Dieses stellt eine Weiterentwicklung des bisherigen Abbrandmodells nach DIN EN 1995-1-2:2010 dar, wobei ein Großteil der Parameter bereits in der bisherigen Fassung enthalten ist.

Mit einer Unterteilung in fünf Phasen lässt sich der Bemessungswert der ideellen Abbrandrate  $\beta_n$  entsprechend der vorliegenden Randbedingungen beschreiben. Neben dem Einfluss von Schutzbekleidungen kann so auch das spezifische Abbrandverhalten von geklebten Holzbauteilen, bei denen es zum Versagen der Klebefuge kommen kann, berücksichtigt werden. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Abbrandgrenze für die fünf Phasen an anfänglich nicht geschützten und anfänglich geschützten Holzoberflächen. Ungeschützte Holzoberflächen brennen mit einer unter ETK als konstant angenommenen Abbrandrate  $ab$  (Phase 1). Bei anfänglich geschützten Holzoberflächen beginnt der Abbrand erst zum Zeitpunkt  $t_{ch}$ , bei dem die Temperatur auf der Holzoberfläche 300 °C beträgt (Phase 0). Beginnt der Abbrand unter der Schutzbekleidung vor dem Versagenszeitpunkt  $t_{f,pr}$  (Abfallen der Bekleidung), so ist eine reduzierte Abbrandrate anzusetzen (Phase 2). Dies liegt daran, dass zwar die Temperaturen für eine Pyrolyse erreicht sind, jedoch durch die weiterhin vorhandene Bekleidung der für die Verbrennung erforderliche Sauerstoff die Pyrolysefront nur bedingt erreicht. Nach dem Abfallen der Bekleidung brennt das Bauteil mit erhöhter Abbrandrate (Phase 3), bis sich zum Zeitpunkt  $t_a$  eine Kohleschicht von 25 mm ausgebildet hat (Phase 4). Die Gründe für die erhöhte Abbrandrate sind, dass zum Versagenszeitpunkt  $t_{f,pr}$  die Einheits-Temperaturzeitkurve bereits ein höheres Temperaturniveau erreicht hat und zugleich noch keine den Wärmeeintrag begrenzende, schützende Kohleschicht ausgeprägt ist [4]. Zudem ist das Holz auch hinter der Bekleidung bereits vorerwärmt. Das bisherige Modell liefert nur für eine geringe Anzahl an Bekleidungsmaterialien und Schichtaufbauten Angaben zur Schutzwirkung ( $t_{ch}$  und  $t_{f,pr}$ ). Zukünftig können variable Schichtaufbauten und eine größere Anzahl an Materialien mit vereinfachten Rechenverfahren oder tabellierten Werten berücksichtigt werden.

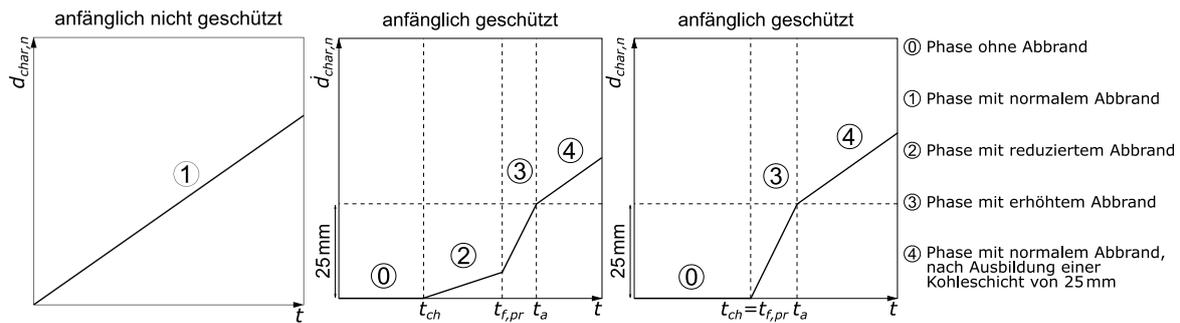


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der Abbrandgrenze für anfänglich nicht geschützte und anfänglich geschützte Holzoberflächen nach prEN 1995-1-2:2023

Die ideale Abbrandtiefe  $d_{char,n}$  ergibt sich unter Berücksichtigung der spezifischen Bemessungswerte der Abbrandrate  $\beta_n$  für die zuvor beschriebenen Phasen nach Gleichung (3).

$$d_{char,n} = \sum_{\text{Phasen}} (\beta_n \cdot t) \quad (3)$$

Der Bemessungswert der Abbrandrate  $\beta_n$  ist das Produkt der zutreffenden Modifikationsbeiwerte  $k_i$  multipliziert mit dem Basiswert der eindimensionalen Abbrandrate  $\beta_0$ , entsprechend Gleichung (4).

$$\beta_n = \prod k_i \cdot \beta_0 \quad (4)$$

Über die Modifikationsbeiwerte erfolgt eine detaillierte Berücksichtigung der Bemessungssituation. Zu berücksichtigende Faktoren sind unter anderem die Faserausrichtung, der Einfluss von erhöhtem Eckabbrand und Rissen bei linearen Bauteilen, der Einfluss von Fugen bei flächigen Bauteilen, der Wärmeeintrag durch Verbindungsmittel sowie Dicke und Dichte bei Holzwerkstoffplatten.

## 5.2. Tragfähigkeit stabförmiger Bauteile

Zukünftig wird nur noch ein vereinfachtes Rechenverfahren zum Nachweis der Tragfähigkeit Anwendung finden. Von den derzeit enthaltenen Nachweismöglichkeiten wird die Methode mit reduzierten Eigenschaften nicht übernommen und die Methode mit reduziertem Querschnitt in die Methode mit **effektivem Querschnitt** überführt und erweitert. Dabei wird die Festigkeitsabnahme des erwärmten Restquerschnitts berücksichtigt, in dem für einen Teil des Restquerschnittes angenommen wird, dass keine Festigkeit mehr vorliegt. Für den verbleibenden (effektiven) Querschnitt darf dann weiterhin die ursprüngliche Festigkeit bei Normaltemperatur angenommen werden. Der effektive Querschnitt ist die Dicke des initialen Querschnitts abzüglich einer effektiven Abbrandtiefe  $d_{ef}$ . Die effektive Abbrandtiefe ist die Summe der ideellen Abbrandtiefe  $d_{char,n}$  und der Dicke der Nullfestigkeitsschicht  $d_0$ .

$$d_{ef} = d_{char,n} + d_0 \quad (5)$$

Die DIN EN 1995-1-2:2010 sieht ab 20 min Brandbeanspruchung eine pauschale Nullfestigkeitsschicht von 7 mm vor. Die Betrachtung von Tabelle 1 zeigt jedoch, dass theoretisch unterschiedliche Werte von  $d_0$  existieren, bspw. für Druck- und Biegebeanspruchungen. Zudem haben Untersuchungen in den letzten Jahren gezeigt, dass eine pauschale Annahme von 7 mm oft zu nicht auf der sicheren Seite liegenden Bemessungen führt [5]. Daher sieht die prEN 1995-1-2:2023 für stabförmige Bauteile eine Erhöhung der Nullfestigkeitsschicht auf 14 mm vor. Für hauptsächlich auf Zug oder Biegung beanspruchte stabförmige Bauteile darf eine Nullfestigkeitsschicht von 10 mm angenommen werden. Bei flächigen Elementen ist sie in Abhängigkeit des betrachteten Bauteils (Wand oder Decke), der Beanspruchung (Druck oder Zug), der Bauteiloberfläche (anfänglich geschützt oder ungeschützt) und der Position der Abbrandgrenze individuell zu ermitteln [6].

In Abbildung 3 werden die Auswirkungen der Änderungen von  $d_0$  anhand einer brandbeanspruchten Holzstütze exemplarisch verglichen. Nach einer Branddauer von 90 Minuten ist die in Anlehnung an DIN EN 1995-1-2:2010 bemessene Stütze zu 100 % ausgelastet. Die gemäß prEN 1995-1-2:2023 bemessene Stützen erreicht dagegen eine um 10 Minuten verkürzte Feuerwiderstandsdauer.

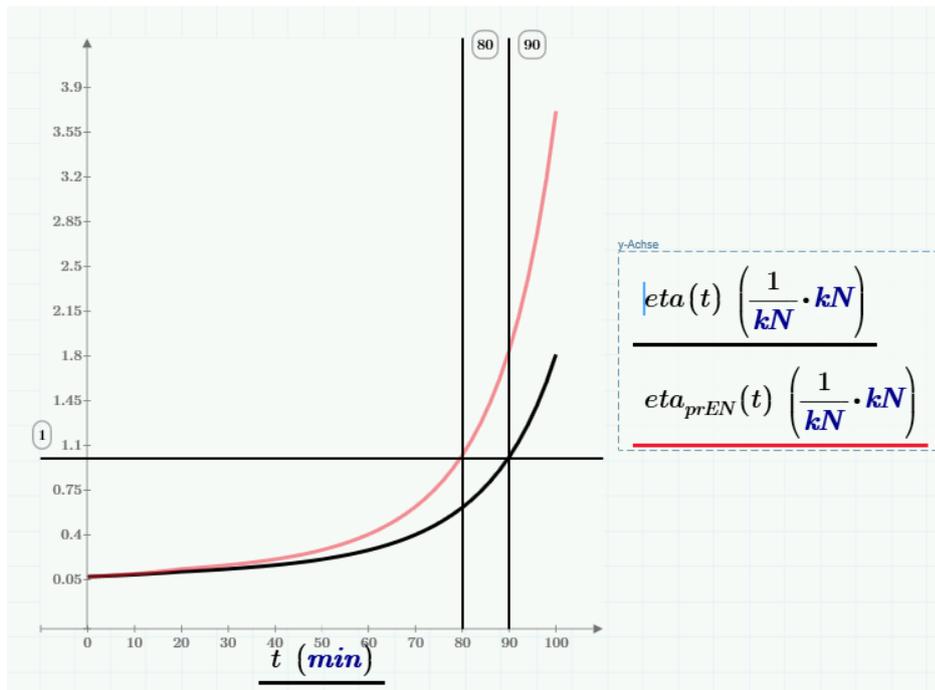


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Ausnutzungsgrade einer brandbeanspruchten Holzstütze im Vergleich Bemessung nach DIN EN 1995-1-2:2010 (eigentlich nur bis 60 Minuten zulässig) zu prEN 1995-1-2:2023

### 5.3. Tragfähigkeit flächiger Bauteile – insbesondere Brettsperrholz (BSP)

Der Brandschutznachweis für Brettsperrholz (Cross Laminated Timber (CLT)) wird in prEN 1995-1-2:2023 neu geregelt und soll in diesem Beitrag exemplarisch für flächige Bauteile aufgenommen werden. Dabei werden aus brandschutztechnischer Sicht grundsätzlich zwei Arten von CLT unterschieden:

*CLT with glue line integrity*: zu Deutsch «BSP mit thermisch stabiler Klebefuge»

*CLT without glue line integrity*: zu Deutsch «BSP mit thermisch instabiler Klebefuge»

Hintergrund des BSP mit thermisch instabiler Klebefuge ist, dass wenn die Abbrandgrenze die Klebefuge erreicht, ein Abfallen der schützenden Holzkohle einsetzt. Dann verhält sich ein eigentlich massiver, einteiliger Querschnitt prinzipiell wie ein anfänglich geschütztes Bauteil. Die erste Lamelle brennt mit «normaler» Abbrandgeschwindigkeit. Aufgrund der Vorerwärmung brennt die nächste Lamelle nach Abfallen der schützenden Kohleschicht mit einer erhöhten Abbrandgeschwindigkeit bis zu einer Tiefe von 25 mm. In dieser sogenannten Konsolidierungsphase normalisieren sich die Wärmeströme wieder und es brennt danach mit «normaler» Geschwindigkeit weiter bis es zu einem erneuten Versagen der Klebefuge kommt. Aufgrund der Mehrschichtigkeit des Brettsperrholzes können insbesondere bei den höheren Feuerwiderstandsdauern im «BSP mit thermisch instabiler Klebefuge» mehrere Konsolidierungsphasen auftreten. Die qualitativen Verläufe der Abbrandgrenzen beider Typen werden in Abbildung 4 vergleichend dargestellt.

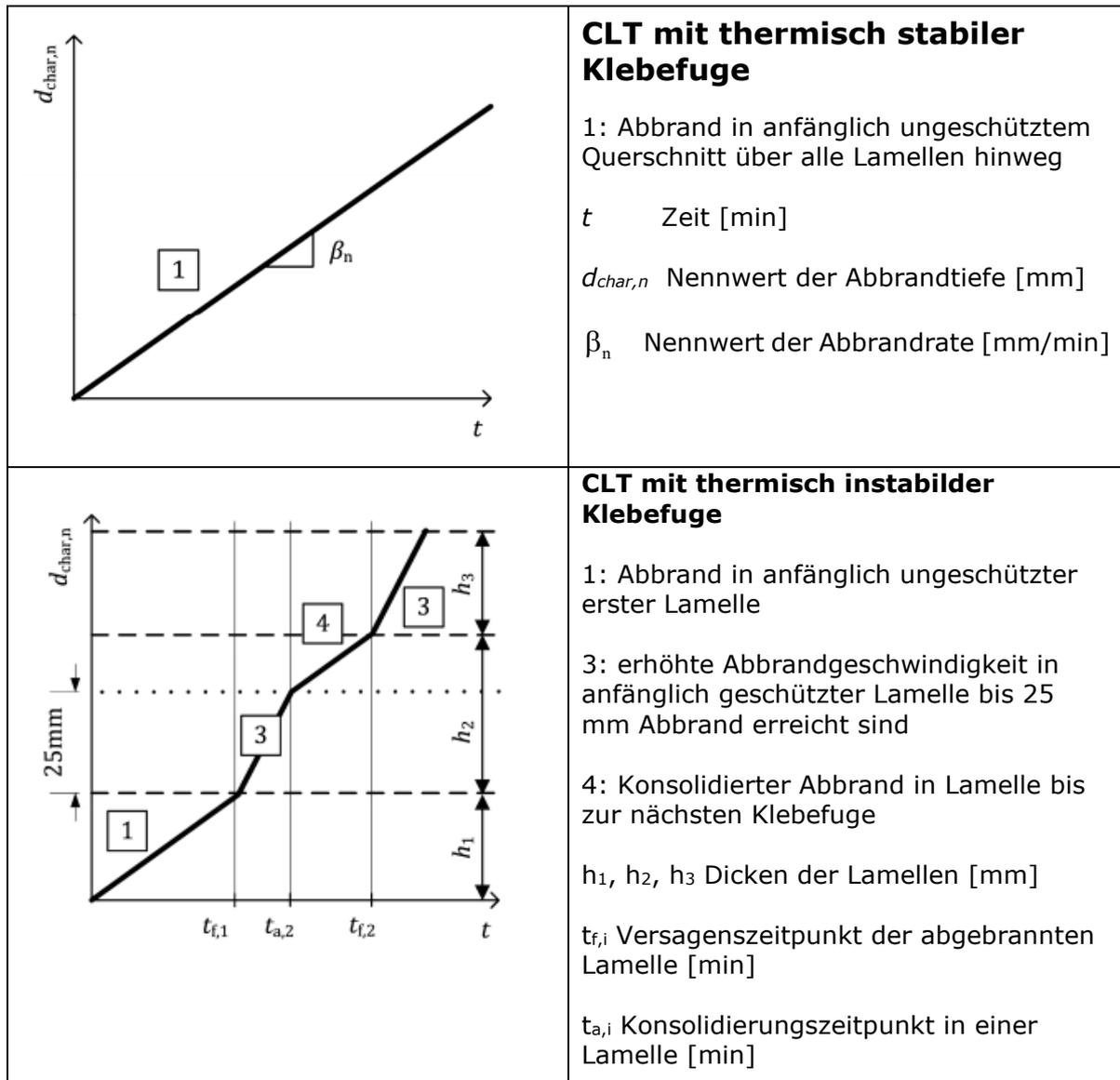


Abbildung 4: Qualitativer Vergleich des Abbrandes in CLT; oben: mit thermisch stabiler Klebefuge; unten: mit thermisch instabiler Klebefuge; [basierend auf den Bildern 5.1 und 5.2 prEN 1995-1-2:2023]

Zur Evaluierung der thermischen Beständigkeit der Flächenverklebung liefert der zukünftige Anhang B ein Prüfverfahren auf Grundlage der in [7] vorgestellten Untersuchung.

Der Bemessungswert der Abbrandrate wird für Brettsperrholz mit thermisch instabiler Flächenverklebung für die Phasen 1 und 4 nach Gleichung (6) berechnet.

$$\beta_n = k_g \cdot \beta_0 \quad (6)$$

Der Fugenfaktor  $k_g$  berücksichtigt den erhöhten Abbrand in Fugen zwischen den Brettlamellen. Bei Fugen  $> 2 \text{ mm} \leq 5 \text{ mm}$  wird die Abbrandrate mit  $k_g = 1,2$  angepasst.

Für von der Unterseite brandbeanspruchte Decken wird die Abbrandrate nach Abfallen der Kohleschicht (Phase 3) entsprechend Gleichung (7) berücksichtigt.

$$\beta_n = 2 \cdot k_g \cdot \beta_0 \quad (7)$$

Für die Bemessung des effektiven Restquerschnittes werden entsprechende Nullfestigkeitsschichten  $d_0$  insbesondere entsprechend der Bauteilart (Wand, Decke), Vorhandensein einer brandschutztechnischen Bekleidung sowie die Spannrichtung der betrachteten Lamelle angegeben.

## 5.4. Tragfähigkeit von Holztafelbauteilen

Holztafelbauteile können ebenfalls mit dem Verfahren des effektiven Restquerschnittes bemessen werden. Dabei werden folgende Grundfälle mit mindestens einer einseitigen Bekleidungsanlage unterschieden:

- vollständig mit Wärmedämmung ausgefüllter Hohlraum,
- teilweise mit Wärmedämmung ausgefüllter Hohlraum,
- Wärmedämmung als seitliche Schutzschicht der tragenden Ständer,
- keine Wärmedämmung

Das Abbrandmodell wird an die jeweils genannten Grundfälle angepasst. Dabei ist nicht nur die Anordnung und Leistungsfähigkeit der Wärmedämmung von Bedeutung, sondern ebenfalls das Vorhandensein und die Leistungsfähigkeit einer Bekleidung. Darüber hinaus ist bei der Bestimmung von  $d_0$  auch die mechanische Beanspruchung zu unterscheiden nach: Biegezug, Biegedruck, Knicken in Wandebene und Knicken aus der Wandebene.

## 6. Bemessung des Raumabschlusses

Die prEN 1995-1-2:2023 bietet in Abschnitt 7.3 die Möglichkeit zur Berechnung der raumabschließenden Funktion (engl. «Separating Function») von Holzbauteile für einen Zeitraum von bis zu 120 Minuten auf Basis der ETK. Neben einer Vielzahl von Bekleidungsmaterialien (u.a. Gipsplatten, Lehmputz, Holzwerkstoffplatten etc.) finden sich auch für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holzfaserdämmstoffe oder Zellulose entsprechenden Berechnungsformeln wieder. Das Modell beruht auf den Annahmen der DIN EN 1995-1-2:2010. Im Rahmen der Arbeiten von Schleifer [8] wurde das Modell der DIN EN 1995-1-2:2010 umfangreich erweitert, um eine beliebige Kombination von Bauteilschichten zu ermöglichen. Weiterhin erlaubt das Modell nun die Berechnung des Beginns der Verkohlung von ursprünglich geschützten Holzbauteilen und den Versagenszeiten von Brandschutzbekleidungen auf Basis der Arbeiten von Mäger und Just [9] sowie Rauch [10, 11].

Das Modell in Abschnitt 7.3 der prEN 1995-1-2:2023 beruht auf der Berechnung einer Isolationszeit auf Basis einer maximalen Temperaturerhöhung von 140 K im Mittel auf der brandabgewandten Seite des Bauteils (I-Kriterium). Es wird davon ausgegangen, dass das Raumabschlusskriterium (E) dann ebenfalls erfüllt ist und die letzte Schicht auf der brandabgewandten Seite weiterhin intakt ist. Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn die Isolationszeit des Bauteils mindestens der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer für den Raumabschluss entspricht.

Ergänzend zur Isolationszeit wurde eine zweite Berechnungsmethode, die sogenannte «Schutzzeit»  $t_{prot}$  eingeführt. Die Grundschutzzeit  $t_{prot,0}$  entspricht dabei dem Zeitintervall bei Beginn der Beflammung mit ETK und dem Erreichen von 270 °C (250 K Temperaturdifferenz) auf der brandabgewandten Seite der jeweiligen Bekleidungsanlage. Es wird davon ausgegangen, dass die jeweilige Schicht (mit Ausnahme von Brandschutzbekleidungen) bei Überschreiten dieses Kriteriums keinen weiteren Beitrag mehr zum Feuerwiderstand leisten kann. Der Zeitpunkt, an dem die raumabschließende Funktion nicht mehr gewährleistet wird, ergibt sich aus der Summe der Schutzzeiten der einzelnen Lagen zuzüglich der Isolationszeit für die letzte brandabgewandte Lage:

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n} \geq t_{req} \quad (8)$$

$t_{ins}$                       Zeitpunkt, bis Raumabschluss gewährleistet [min]

$t_{prot,i}$                     Schutzzeit der Schichten bis zur letzten brandabgewandten Schicht [min]

$t_{ins,n}$                     Isolationszeit der letzten brandabgewandten Schicht [min]

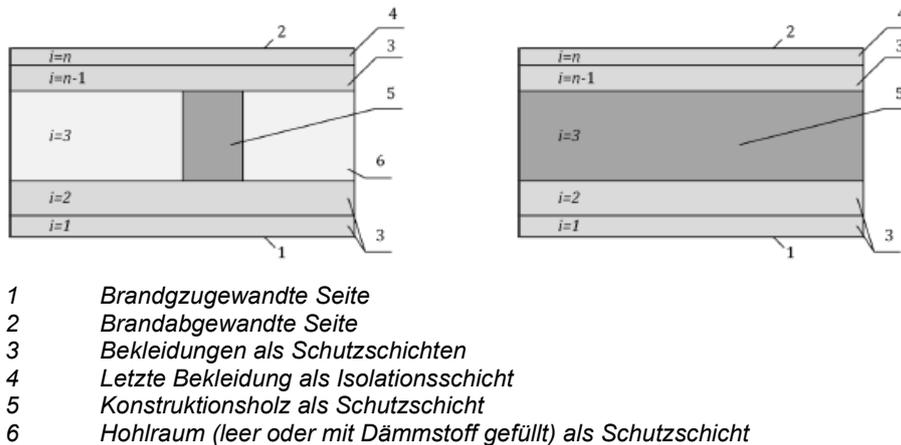


Abbildung 5: Nummerierung und Funktion der jeweiligen Bauteilschichten (auf Basis prEN 1995-1-2:2023 (E) figure 7.10)

Die Schutzzeit der Lage  $i$   $t_{prot,i}$  ergibt sich unter Berücksichtigung der Grundschutzzeit  $t_{prot,0,i}$ , den Faktoren für die Position der jeweiligen Lage in Bezug zum Brandherd im Hinblick auf Vorerwärmung  $t_{pos}$ , der Einflüsse durch Fugen  $k_{j,i}$  und dem Korrekturbeiwert für Brandschutzbekleidungen  $\Delta t_i$  zu:

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} * k_{pos,exp,i} * k_{pos,unexp,i} + \Delta t_i) * k_{j,i} \quad (9)$$

Die einzelnen Beiträge zur Schutzzeit werden nachfolgend im Detail erläutert:

Die Grundschutzzeiten können für eine Vielzahl von Dämmstoffen und Bekleidungsmaterialien auf Basis der Formeln in prEN 1995-1-2; Tab. 7.10 berechnet werden und sind unter anderem von der Dicke und den Wärmeleitungseigenschaften der Materialien abhängig. Außerdem wird die (maximale) Schutzwirkung der Dämmstoffe mittels sogenannter «Protection Levels (PL)» unterschieden und kann für weitere Produkte mittels Anhang D bestimmt werden. Ein vorzeitiges Herausfallen des Dämmstoffes muss ausgeschlossen werden, da sich ansonsten die Schutzzeit auf null reduzieren würde.

Der Einfluss von Lagen, die sich in Bezug auf den Brandraum vor- ( $k_{pos,exp}$ ) bzw. hinter ( $k_{pos,unexp}$ ) der betrachteten Bekleidungs Lage befinden wird mittels der Positionsbeiwerte differenziert. Die Positionswerte können den Tabellen 7.12 bzw. 7.13 entnommen werden oder im Falle von nicht-gedämmten Hohlräumen mit einer Dicke  $\geq 40$  mm sind modifizierte Positionswerte nach Tabelle 7.14 anzuwenden.

Brandschutzbekleidungen wie Gipskartonfeuerschutz- oder Lehmplatten aber auch Mineralwolle (PL 1) versagen erst bei einer deutlich höheren Temperatur und werden daher mittels eines in Abschnitt 7.3.6 vorgegebenen Korrekturbeiwerts  $\Delta t_i$  für die Zeitdifferenz des späteren Abfallens/Versagens berücksichtigt. Die Korrekturzeit für den reduzierten Abbrand der jeweiligen Lagen ist davon abhängig, ob die Brandschutzmaßnahme ihre Funktion vollständig aufrecht erhält, bis die jeweilige Lage ihre Schutzfunktion verliert ( $\Delta T \geq 250$  K) oder ob diese bereits vorher versagt. Für letzten Fall darf eine Interpolation zwischen einer ungeschützten und vollständig geschützten Lage erfolgen.

Der Fugenkoeffizient  $k_{j,i}$  für Schichten mit Fugen auf deren Rückseite eine Lattung, Plattenbekleidung, Konstruktionsholz, Dämmung oder einem Hohlraum mit einer Dicke von weniger als 40 mm kann mit eins angenommen werden. Andernfalls sind die Fugenbeiwerte anhand der unterschiedlichen Fugentypen gemäß prEN 1995-1-2; Tabelle 7.15 festzulegen.

Die Berechnung der Isolationszeit für die letzte Lage  $t_{ins,n}$  ergibt sich ähnlich wie die Berechnung der Schutzzeiten auf Basis von Grundisolationszeiten und der Berücksichtigung von Einflüssen brandzugewandter (vorerwärmter) Schichten sowie der Brandschutzmaßnahmen und dem Einfluss von Fugen zu:

$$t_{ins,n} = (t_{ins,0,n} * k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) * k_{j,n} \quad (10)$$

Die jeweiligen Grundisoliationszeiten  $t_{ins,n}$  können für eine Vielzahl von Dämmstoffen und Bekleidungsmaterialien auf Basis der Formeln in prEN 1995-1-2; Tabelle 7.11 berechnet oder alternativ auf Basis des Verfahrens in prEN 1995-1-2; Anhang G bestimmt werden. Hierzu ist die Kalibrierung eines thermischen Modells mit Brandversuchen (Brandofen nach DIN 4102-8 oder größer), basierend auf effektiven Materialparametern ähnlich zu [8] erforderlich. Abschließend muss das thermische Modell mit mindestens einem realmaßstäblichen Brandversuch validiert werden.

Die in prEN 1995-1-2; Abschnitt 7.3 vorgestellte Methode zur Berechnung des Raumabschlusses erweitert die Bemessung von Holzbauteilen maßgeblich. Es muss jedoch beachtet werden, dass diese aufgrund der beschriebenen Kalibrierung thermischer Modelle mittels effektiver Materialparameter entsprechenden Anwendungsgrenzen unterliegen und konservativ ausgelegt sind. Die Entwicklung universeller Modelle, mit denen beispielsweise eine Berechnung auf Basis von Naturbrandkurven möglich ist, ist derzeit noch ausstehend.

## 7. Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken

Bei Holz-Beton-Verbunddecken (HBV-Decken) sind zwei Haupttypen zu unterscheiden: Systeme mit linearen Holz-Unterzügen und Systeme mit flächigen Holzschichten wie Brettstapel oder Brettsperrholz. In diesem Beitrag wird der Focus auf Systeme mit Holz-Unterzügen gelegt, bei denen der nachgiebige Verbund zwischen Holz und Beton durch axial belastete Verbundschrauben hergestellt wird.

Die in den dreiseitig beflamten Holzbalken eindringende Temperatur hat Auswirkungen auf die Festigkeit und Steifigkeit des nachgiebigen Verbundes. Auch lagern sich infolge der veränderten Verbindungsmittelsteifigkeit und des Flächenträgheitsmomentes des reduzierten Holzquerschnittes Schnittgrößen um, sodass im Brandfall eine Schnittgrößenermittlung wie unter Normaltemperaturen erforderlich ist.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Temperaturentwicklung in der Mittellinie eines HBV-Querschnittes. Vor dem technologischen Hintergrund der Angaben zum temperaturabhängigen E-Modul von Holz gemäß Tabelle 1 ist ein signifikanter Verlust der Steifigkeit im Verbindungsmittel bereits bei Temperaturen von weniger als 100° C zu erwarten. Folgerichtig finden sich in prEN 1995-1-2 entsprechende Regelungen, um die Auswirkungen zu berücksichtigen.

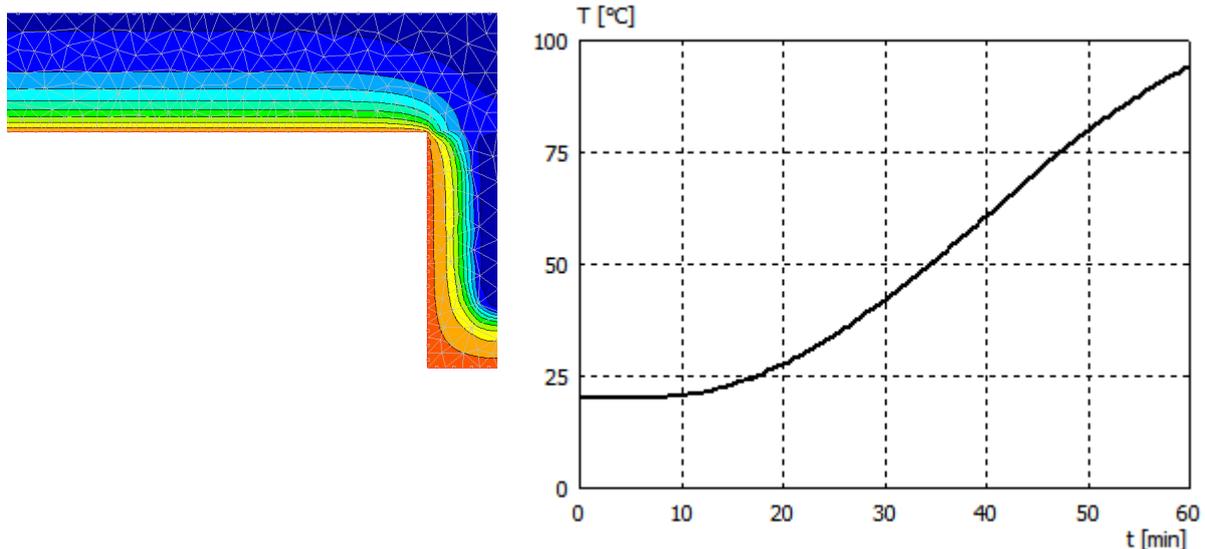


Abbildung 6: Thermische Analyse einer HBV-Decke: Betondeckschicht  $h=12$  cm; Brettstapelschicht  $14/24$  cm/cm. Temperaturverlauf in der Mittellinie zwischen Holz und Beton

Die Steifigkeit im Brandfall ermittelt sich zu:

$$K_{fi} = \eta_{K,fi} \cdot K \quad (11)$$

mit

$K_{fi}$  Verschiebungsmodul im Brandfall

$K$  Verschiebungsmodul für Normaltemperatur gemäß EC 5-1-1 oder Verwendbarkeitsnachweis

$\eta_{K,fi}$  Reduktionsfaktor für die Steifigkeit

Für die Ermittlung des Reduktionsfaktors ist die Durchführung einer eigenen thermischen Analyse nicht erforderlich.  $\eta_{K,fi}$  lässt sich vereinfacht über die seitliche Überdeckung der Verbindungsmittel mit Holz darstellen:

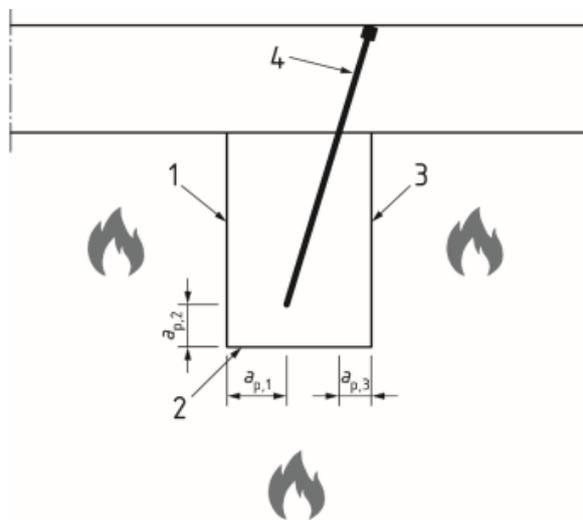
$$\eta_{K,fi} = \begin{cases} 0 & \text{für } a_p \leq 0,65 \cdot t_{req} \\ \frac{0,2 \cdot a_p - 0,12 \cdot t_{req}}{0,2 \cdot t_{req} + 3} & \text{für } 0,65 \cdot t_{req} \leq a_p \leq 0,8 \cdot t_{req} + 3 \\ \frac{0,8 \cdot a_p - 0,6 \cdot t_{req} + 1,8}{0,2 \cdot t_{req} + 21} & \text{für } 0,8 \cdot t_{req} + 3 \leq a_p \leq t_{req} + 24 \\ 1,0 & \text{für } a_p \geq t_{req} + 24 \end{cases} \quad (12)$$

mit

$a_p$  seitliche Überdeckung des Verbindungsmittels

$t_{req}$  erforderliche Feuerwiderstandsdauer in min

Die damit einhergehenden geometrischen Randbedingungen werden in Abbildung 7 dargestellt.



Legende:

**1, 2, 3** brandbeanspruchte Seiten

**4** Verbindungsmittel

**$a_{p,i}$**

Abstand von der brandbeanspruchten Seite i [mm]

Abbildung 7: Querschnitt eines brandbeanspruchten Holz-Beton-Verbundbauteils, Definition des Abstandsmaßes  $a_{p,i}$ . [entspricht Bild 9.6 aus prEN 1995-1-2]

Die Tragfähigkeit der Verbindungsmittel ist durch den Temperaturanstieg im Querschnitt ebenfalls reduziert. Der charakteristische Widerstand im Brandfall lautet:

$$R_{k,fi} = \eta_{R,fi} \cdot R_K \quad (11)$$

mit

$R_{k,fi}$  charakteristische Tragfähigkeit der Verbindungsmittel im Brandfall

$R_K$  Charakteristische Tragfähigkeit der Verbindungsmittel für Normaltemperatur gemäß EC 5-1-1 ohne Ansatz der effektiven Anzahl der Verbindungsmittel

$\eta_{R,fi}$  Reduktionsfaktor für Widerstand

Der Reduktionsfaktor für den Widerstand  $\eta_{R,fi}$  für zugbeanspruchte Schrauben wird analog zur Steifigkeit in Abhängigkeit von der seitlichen Überdeckung ermittelt:

$$\eta_{R,fi} = \begin{cases} 0 & \text{für } a_p \leq 0,65 \cdot t_{req} \\ \frac{0,44 \cdot a_p - 0,264 \cdot t_{req}}{0,2 \cdot t_{req} + 5} & \text{für } 0,65 \cdot t_{req} \leq a_p \leq 0,8 \cdot t_{req} + 5 \\ \frac{0,56 \cdot a_p - 0,36 \cdot t_{req} + 7,32}{0,2 \cdot t_{req} + 23} & \text{für } 0,8 \cdot t_{req} + 5 \leq a_p \leq t_{req} + 28 \\ 1,0 & \text{für } a_p \geq t_{req} + 28 \end{cases} \quad (12)$$

In Abbildung 8 werden die Verläufe der Gleichungen (10) und (12) exemplarisch für die Feuerwiderstandsklasse R30 in Abhängigkeit von der Überdeckung  $a_p$  aufgezeigt. Im Bild wird deutlich, dass der Verlust der Steifigkeit dem Verlust der Festigkeit vorseilt.

Der Teilquerschnitt aus Holz ist grundsätzlich über das Verfahren mit effektivem Querschnitt für die Teilschnittgrößen nachzuweisen. Die Betonplatte ist nach Eurocode 2-1-2 nachzuweisen.

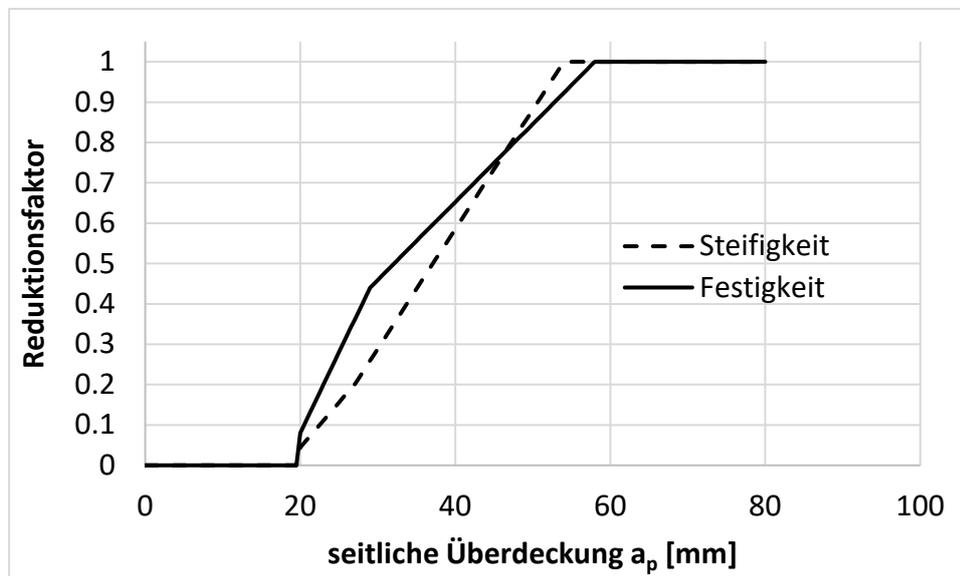


Abbildung 8: Auswertung der Gleichungen (10) und (12) für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten

## 8. Verbindungsmittel

Mit den Bemessungsregeln nach Kapitel 9 der prEN1995-1-2:2023 können Verbindungen mit metallischen Verbindungsmittel bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten bemessen werden. Die Regeln gelten sowohl für Holz-Holz- als auch für Holz-Stahl-Verbindungen. Es existieren für den Nachweis der Verbindungen grundsätzlich zwei alternativ anwendbare Wege.

Vereinfachte Bemessungsregeln:

In prEN 1995-1-2:2023 werden in Tabelle 9.1 Feuerwiderstandsdauern für Verbindungen angegeben, die bei Normaltemperatur gemäß Eurocode 5-1-1 ordnungsgemäß bemessen wurden und einen Ausnutzungsgrad von  $\eta_{fi} = E_{d,fi}/R_k \leq 0,3$ . Bei Einhaltung der Anforderungen an die Seitenholzdicke weisen die Verbindungen eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 15 Minuten auf. Für Verbindungen mit Dübeln beträgt die Feuerwiderstandsdauer sogar 20 Minuten. Diese Feuerwiderstandsdauer kann für Dübel als Holz-Holz-Verbindung durch Erhöhung der Randabstände bis auf 90 Minuten erhöht werden. Für Dübelverbindungen mit eingelegten Stahlblechen kann auf die gleiche Weise die Feuerwiderstandsdauer sogar bis auf 120 Minuten erhöht werden. Die dazu erforderlichen Mindestholzdicken  $t_{1,fi}$

und Vergrößerungen der Randabstände  $a_{fi}$  werden in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades in Tabellenform (prEN 1995-1-2; Tab. 9.2 – 9.5) angegeben. Für andere Verbindungsmittel können weitere Bemessungstabellen im Nationalen Anhang angegeben werden.

Die zweite Möglichkeit Verbindungen brandschutztechnisch nachzuweisen ist die «exponential reduction method». Diese ist universeller anwendbar und kann daher auch für individuell geplante Verbindungen, die nicht in den Tabellen enthalten sind, angewendet werden. Sie bietet zudem die Möglichkeit innerhalb ihrer Anwendungsgrenzen die erforderliche Feuerwiderstandsdauer, ohne eine Erhöhung der Bauteilabmessungen gegenüber den Vorgaben des Eurocode 5-1-1 zu erreichen.

Die Feuerwiderstandsdauer der Verbindung wird in Abhängigkeit des Ausnutzungsfaktors  $\eta_{fi}$ , der Seitenholzdicken  $t_{1,fi}$  und der Ausführungsart der Verbindung ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ) berechnet mit:

$$t_{fi} = \alpha_1 * t_{1,fi} - \frac{1}{\alpha_2} * \ln(\eta_{fi} * 100) + \alpha_3 \quad (13)$$

Die alpha-Werte können einfach aus Tabellen in Abhängigkeit der verwendeten Materialien (Holz-Holz, Holz-Stahl) und der Anzahl der Scherfugen abgelesen werden.

Wird mit der so berechneten Feuerwiderstandsdauer die Mindestfeuerwiderstandsdauer aus prEN 1995-1-2; Tab. 9.1 überschritten, müssen die Randabstände der Verbindungsmittel aus der Bemessung bei Normaltemperatur um  $a_{fi}$  vergrößert werden.

$$\alpha_{fi} = k_{con} * \beta_0 * (t_{req} - t_{fi,min}) \quad (14)$$

$k_{con}$	Erhöhungsfaktor für die Abbrandrate (nach Art der Verbindung)
$\beta_0$	eindimensionale Abbrandrate
$t_{req}$	erforderliche Feuerwiderstandsdauer
$t_{fi,min}$	Minimale Feuerwiderstandsdauer der nach EC 5-1-1 bemessenen Verbindung

In Kapitel 9.4 werden ergänzende Regelungen aufgeführt, um einen thermischen Schutz der Verbindungen durch Bekleidungen, die die Feuerwiderstandsdauer erhöhen, zu berücksichtigen.

Bemessungsregeln für auf Herausziehen beanspruchte Schrauben sind in Kapitel 9.3 der prEN1995-1-2 dargestellt.

## 9. Allgemeine Rechenverfahren

Die allgemeinen Rechenverfahren sind grundsätzlich in eine thermische und eine mechanische Analyse aufzuteilen, welche in der Regel mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt werden: die thermische Analyse zur Ermittlung der Temperaturverteilung im Querschnitt und die mechanische Analyse zur Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens des Bauteils. Je nach Komplexität des verwendeten Programms ist es prinzipiell auch möglich, beide Analysen direkt miteinander zu koppeln.

Für zahlreiche Fragestellungen ist es ggf. auch ausreichend, lediglich eine thermische Analyse durchzuführen, bspw. für den Nachweis des Isolationskriteriums oder im Zusammenhang mit schutzzielorientierten Nachweisen im Kontext der DIN 18009.

In Abbildung 9 wird exemplarisch die Untersuchung der Auflagersituation einer Decke aus Furnierschichtholz auf einer Stahlbeton-Linienkonsole gezeigt. Fragestellung ist die Temperaturentwicklung im Elastomerlager und somit die Mindestbreite der davorliegenden Mineralwolle. Die thermischen Materialkennwerte für Furnierschichtholz und Mineralwolle sind prEN 1995-1-2:2023 entnommen. Die Materialkennwerte des Betons entsprechen DIN EN 1992-1-2:2010 [12]. Da das Elastomerlager in der dargestellten Situation nicht heißer als dessen zulässige Betriebstemperatur gemäß Anwendbarkeitsnachweis wird, können die Materialeigenschaften aus den technischen Datenblättern direkt entnommen werden. Würde die zulässige Betriebstemperatur dagegen überschritten, wären deutlich weitergehende Überlegungen zur korrekten Beschreibung des Elastomers erforderlich.

Anhand dieses Beispiels sollen die generellen Möglichkeiten allgemeiner Rechenverfahren exemplarisch dargestellt werden. Es soll aber auch nicht verschwiegen werden, dass die Anwendung große Sorgfalt und Kenntnisse des Abbrandverhaltens von Holzkonstruktionen erfordert. Denn in der Regel können die Modelle die Rissbildung in Schutzschichten oder dessen Abfallen nicht korrekt abbilden. Inwieweit die Anwendung eines allgemeinen Rechenverfahrens aufgrund der Randbedingungen und anzuwendenden Materialgesetze von den eingeführten technischen Baubestimmungen wesentlich abweichen und eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung erforderlich wird, muss projektbezogen im Einzelfall entschieden werden und ist in diesem Beitrag nicht Gegenstandlich.

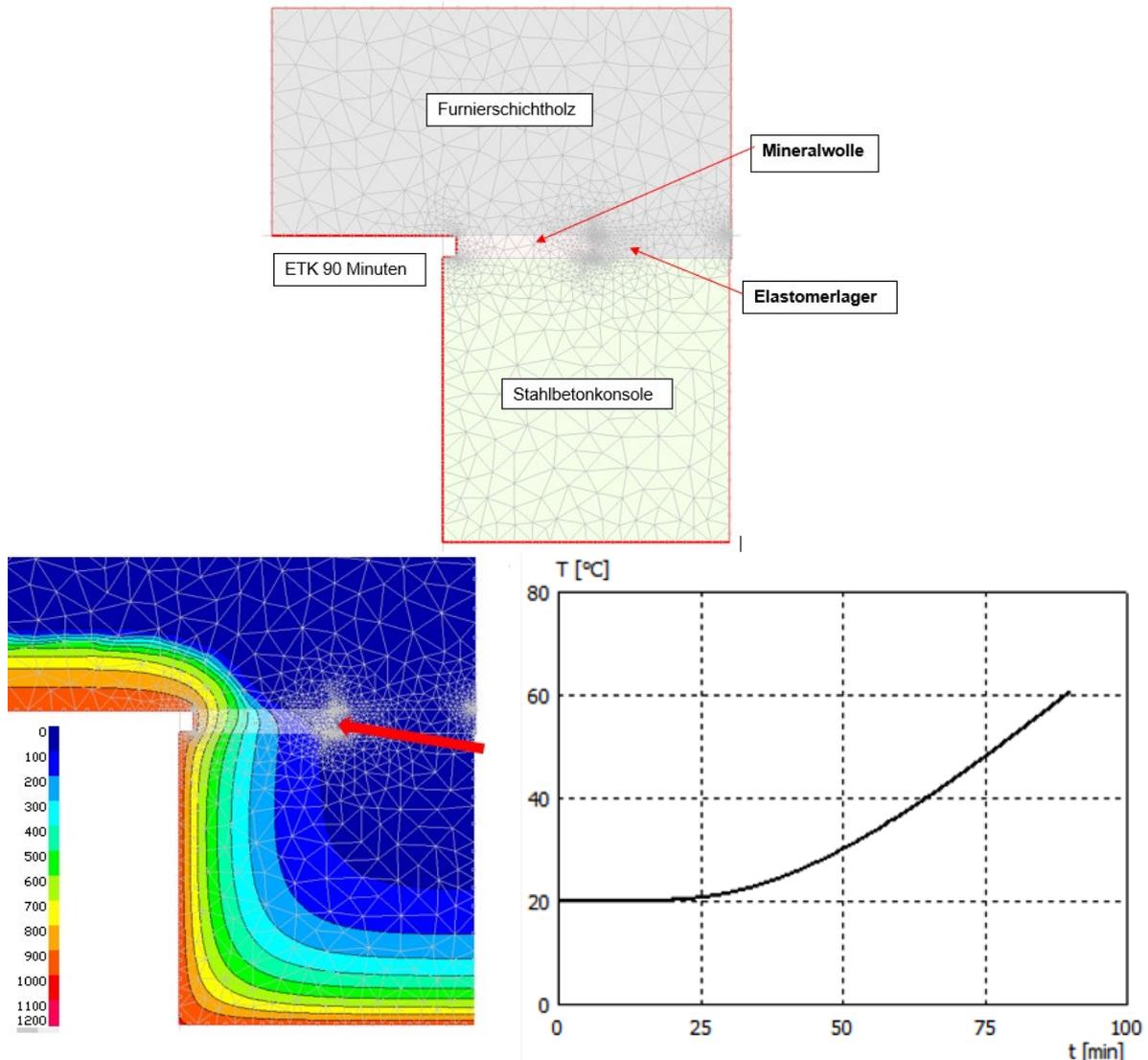


Abbildung 9: Untersuchung der Temperaturverteilung im Bereich des Auflagers einer Decke aus Furnierschichtholz auf einer Stahlbeton-Linienkonsole

## 10. Naturbrandnachweis

Die prEN 1995-1-2:2023 enthält in ihrem Anhang A Regeln zur Berechnung eines Naturbrands nach FprEN 1991-1-2; Anhang A, wenn die Konstruktion aus Holzbauteilen besteht und somit ebenfalls zur Brandlast beiträgt. Die so berechnete Naturbrandkurve kann bei Sonderfällen anstelle der ETK verwendet werden.

Die entsprechend FprEN 1991-1-2:2023 als «charakteristische Brandlastdichte» ( $q_{f,k}$ ) beschriebene Brandlastdichte wird in prEN 1995-1-2:2023 als «mobile Brandlastdichte» ( $q_{m,k}$ ) definiert. Die mobile Brandlastdichte umfasst die Brandlasten, die aus der Nutzung des Bauwerks resultieren. Entsprechend prEN 1995-1-2:2023 bildet sie zusammen mit der «strukturellen Brandlastdichte» ( $q_{st,k}$ ) die Gesamtbrandlastdichte ( $q_{f,k}$ ).

Die strukturelle Brandlastdichte ist die Brandlastdichte der aus Holzbauteilen bestehenden Gebäudekonstruktion. Sie ergibt sich aus der Menge der im Brandverlauf abbrennenden Masse der Holzbauteile. Der Abbrand des Holzes ist abhängig von der Branddauer und der Brandraumtemperatur.

Aufgrund dieser sich gegenseitig beeinflussenden Prozesse ist die Abbrandtiefe des Holzes über den gesamte Brandverlauf ( $d_{char,t}$ ) iterativ zu berechnen, bis sie in einem Berechnungsschritt nicht mehr als 0,5 mm zunimmt. Konstruktive Änderungen zur Verringerung der strukturellen Brandlastdichte, z. B. durch die Bekleidung von Teilflächen der ungeschützten Holzoberflächen, können zu kürzeren Branddauern und weniger Holzabbrand führen.

## 11. Zusammenfassung und Ausblick

Der zukünftige Brandschutzteil des Eurocode 5 wird den Anwendungsbereich deutlich erweitern. Insbesondere die Ausweitung der Bemessungsverfahren für Feuerwiderstandsdauern von mindestens 90 Minuten wird dem baurechtlichen Rahmen für mehrgeschossige Holzbauten in Deutschland gerecht.

Zudem können größere Variationen an Bauteilen rechnerisch nachgewiesen werden. Dies betrifft sowohl die Bauteilaufbauten als auch die verwendeten Baustoffe. Beispielhaft ist hier insbesondere die Öffnung der Nachweisverfahren für Holzfasern- und Zellulosedämmstoffe zu nennen. Auch die Aufnahme rechnerischer Nachweisverfahren für Brettsperrholzbauweise und Holz-Beton-Verbunddecken ist ein wichtiger Schritt für den modernen Holzbau, um die brandschutztechnischen Nachweise zu erleichtern.

Die Aufnahme tabellarischer Bemessungsverfahren stellt einen Schritt zur Vereinfachung der bisherigen Nachweisformate für wenige Sonderfälle dar. Dies kann jedoch über den Nationalen Anhang deutlich erweitert werden.

Trotz der Weiterentwicklung des Naturbrandnachweises für Holzbauteile wird dieser Weg auch zukünftig auf wenige Sonderfälle begrenzt bleiben.

## 12. Literatur

- [1] prEN 1995-1-2: Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-2: Structural fire design; CEN/TC 250; Date: 2023-01
- [2] DIN EN 1995-1-2: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Ausgabe: 2010-12
- [3] FprEN 1991-1-2: 2023: Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-2: Actions on structures exposed to fire; CEN/TC 250; Date: 2023-01
- [4] A. Frangi, C. Erchinger, und M. Fontana, «Charring model for timber frame floor assemblies with void cavities», *Fire Safety Journal*, Bd. 43, Nr. 8, S. 551–564, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.firesaf.2007.12.009.
- [5] J. Schmid, J. König, und A. Just, «The Reduced Cross-Section Method for the Design of Timber Structures Exposed to Fire – Background, Limitations and New Developments», *Structural Engineering International*, Bd. 22, Nr. 4, S. 514–522, Nov. 2012, doi: 10.2749/101686612X13363929517578.
- [6] R. Fahrni und M. Klippel, «Hintergründe der Tragwiderstandsbemessung von Brettsperrholz im Brandfall», Mai 2021, doi: 10.3929/ETHZ-B-000489944.
- [7] M. Klippel, J. Schmid, R. Fahrni, M. Kleinhenz, und A. Frangi, «Vorschlag einer Standardprüfmethode für Brettsperrholz im Brandfall», *Bautechnik*, Bd. 96, Nr. 11, S. 824–831, Nov. 2019, doi: 10.1002/bate.201900019.
- [8] Schleifer, V. (2009) Zum Verhalten von raumabschliessenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall, Dissertation, ETH Zrich.
- [9] Mäger, K. N., Just, A. & Frangi, A. (2018). Improvements to the Component Additive Method. SiF 2018– The 10th International Conference on Structures in Fire. Ulster University, Belfast, UK.

- [10] Rauch, M. (2022): Beurteilung der raumabschließenden Funktion brandbeanspruchter Holzbauteile mittels einer «Component Additive Method». Dissertation. Technische Universität München
- [11] Rauch et al. (2022): Fire design methods for timber frame assemblies – an improved model for the Separating Function Method, Conference: INTER – International Network on Timber Engineering Research, Meeting 9 (INTER Meeting 2022) Bad Aibling, Germany
- [12] DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Ausgabe: 2010-12