

Brandverhalten und Bemessung von Holzbauteilen und Verbindungsmitteln

Prof. Dr. Andrea Frangi
ETH Zürich

Problematik von Holz im Brandfall

- Durchbrand von Wänden und Decken
- Brandausbreitung über Oberfläche und in Hohlräumen
- Brandverhalten von QS mit geringen Abmessungen
- Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen
- Ungeschützte Verbindungen aus Stahl
- Vergrößerung der Brandlast

Forschung - Stand des Wissens

Forschungsprojekte an der ETH Zürich (IBK) Baulicher Brandschutz im Holzbau		Experimentelle Untersuchungen
Brandverhalten von Decken - Holz-Beton-Verbunddecken - Holzdecken aus Brettstapel - Holzdecken aus Brettsperrholz - Holzdecken aus Hohlkastenelementen		Brandversuche unter Normbrandeinwirkung
Brandverhalten von Wänden - Ständer-Wandkonstruktionen - STEKO Wände		Brandversuche unter Normbrandeinwirkung
Brandverhalten von verlebten Holzbauteilen (Einfluss des Klebstoffes)		Brandversuche unter Normbrandeinwirkung
Brandverhalten von nicht- und brennbaren Dämmungen		Brandversuche unter Normbrandeinwirkung
Brandabschnittsbildung von zusammengesetzten Wand- und Deckenkonstruktionen (EI Kriterium)		Brandversuche unter Normbrandeinwirkung
Brandverhalten von Verbindungen		Brandversuche unter Normbrandeinwirkung
Brandverhalten von Holzmodulen		Naturbrandversuche inkl. tech. Massnahmen

Gliederung

- Grundlagen zum Brandverhalten von Holz
- Bemessungsmethoden für den Brandfall
- Brandverhalten von verlebten Bauteilen
- Verbindungen im Brandfall
- Berechnungsverfahren für brandabschnittsbildende Bauteile
- Naturbrand



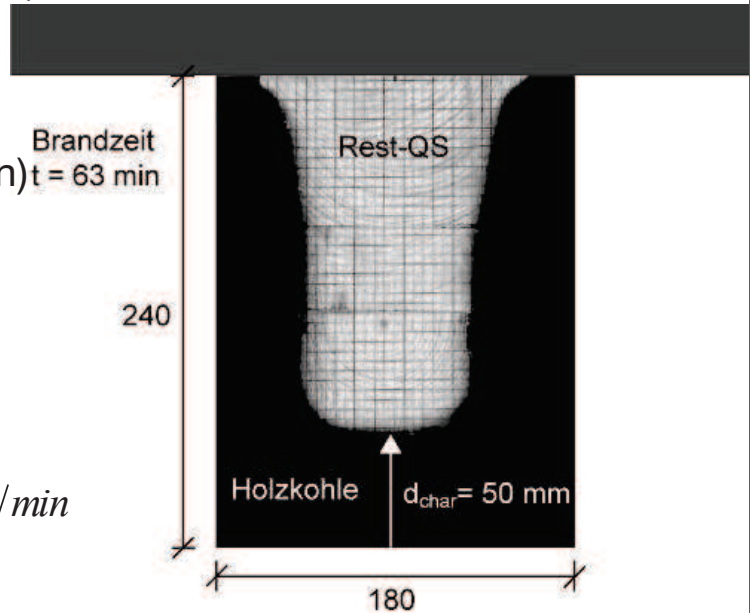


Brandverhalten von Holz

- Pyrolyse: Zersetzung des Holzes unter Bildung von Holzkohle und brennbaren Gasen (ab ca. 250°C)
- Abbrandgeschwindigkeit β :
Verkohlungstiefe d_{char} bezogen auf die Branddauer t (in mm/min)

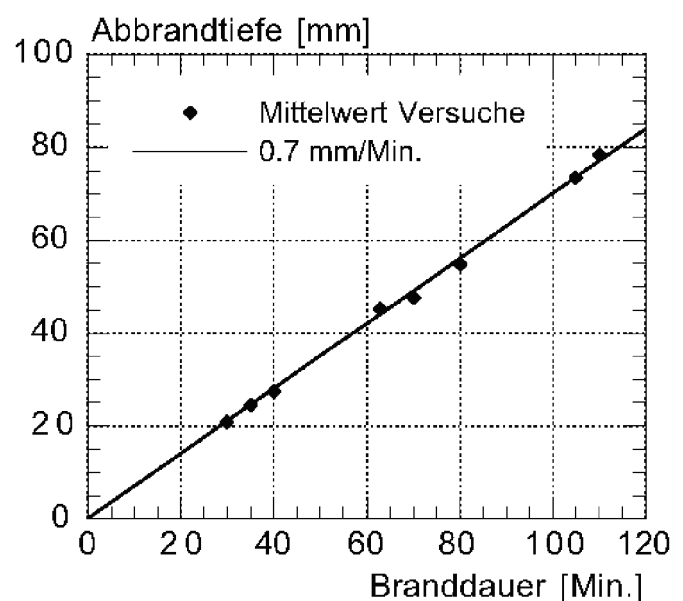
$$\beta = \frac{d_{char}}{t}$$

$$\beta = \frac{d_{char}}{t} = \frac{50 \text{ mm}}{63 \text{ min}} = 0.8 \text{ mm/min}$$



Abbrandgeschwindigkeit

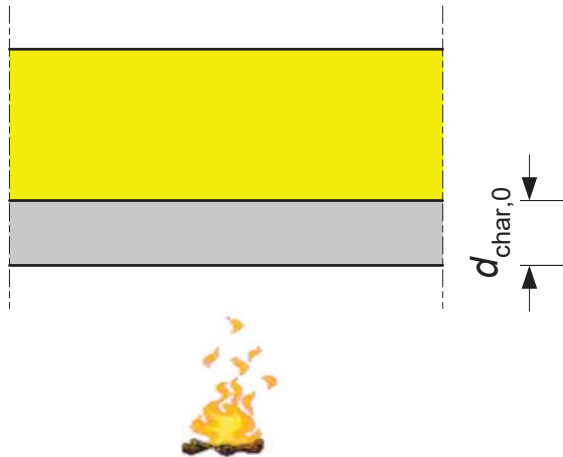
- abhängig von der Temperatureinwirkung
 - bei ISO-Normbrandeinwirkung während der Zeit nahezu konstant
- abhängig von der Holzart
 - für Fichte: $\beta \approx 0.7 \text{ mm/Min.}$
- Einfluss der Holzfeuchte und der Rohdichte gering





Abbrandgeschwindigkeit

- Abbrandgeschwindigkeit β_0 für den eindimensionalen Abbrand

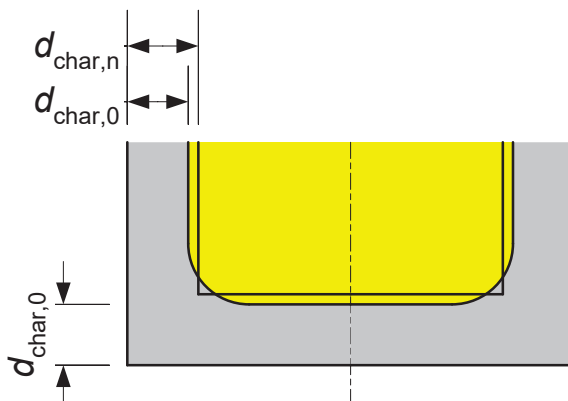


$$d_{\text{char},0} = \beta_0 \cdot t$$



Abbrandgeschwindigkeit

- Ideale Abbrandgeschwindigkeit β_n
 - β_n berücksichtigt näherungsweise die Effekte der Eckausrundungen und von Rissen
 - β_n grösser als diejenige für den eindimensionalen Abbrand β_0

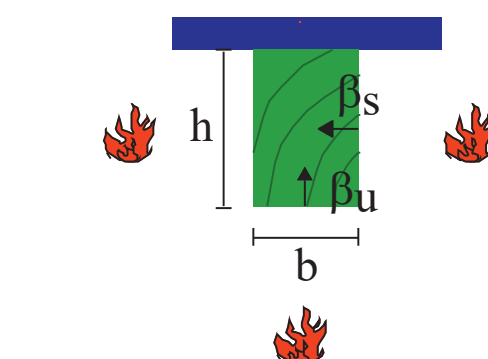
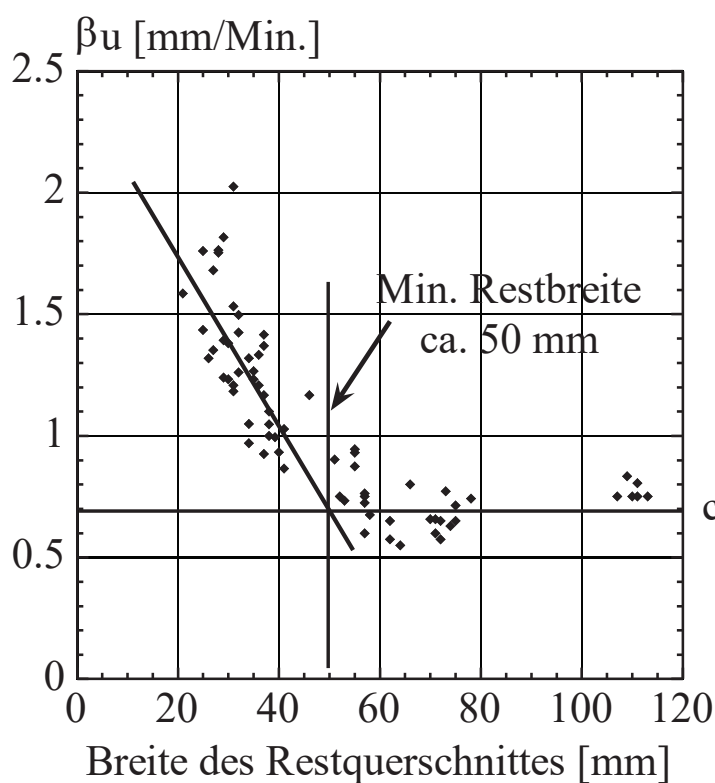


$$d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t$$

Abbrandgeschwindigkeit gemäss EN 1995-1-2

Holzart	β_0 [mm/Min.]	β_n [mm/Min.]
Nadelholz und Buche		
BSH mit einer charakt. Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
Vollholz mit einer charakt. Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.8
Laubholz		
Vollholz oder Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
Vollholz oder Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0.5	0.55
Furnierschichtholz mit einer charakt. Rohdichte von $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
Platten		
Holzbekleidungen	0.9	-
Sperrholz	1.0	-
Holzwerkstoffplatten ausser Sperrholz	0.9	-

Abbrandgeschwindigkeit

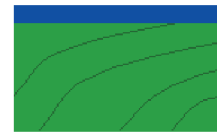
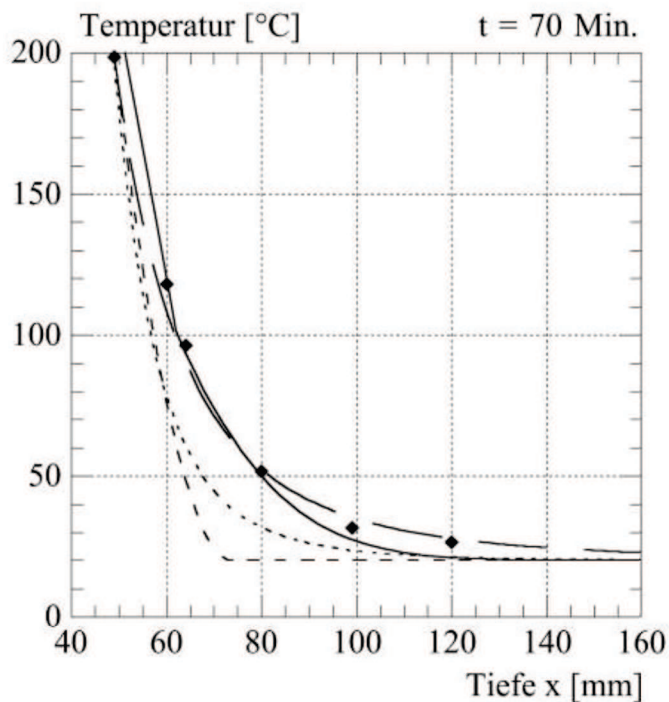


ca. 0.7 mm/Min.

• Versuch



Temperaturverlauf im Holzquerschnitt

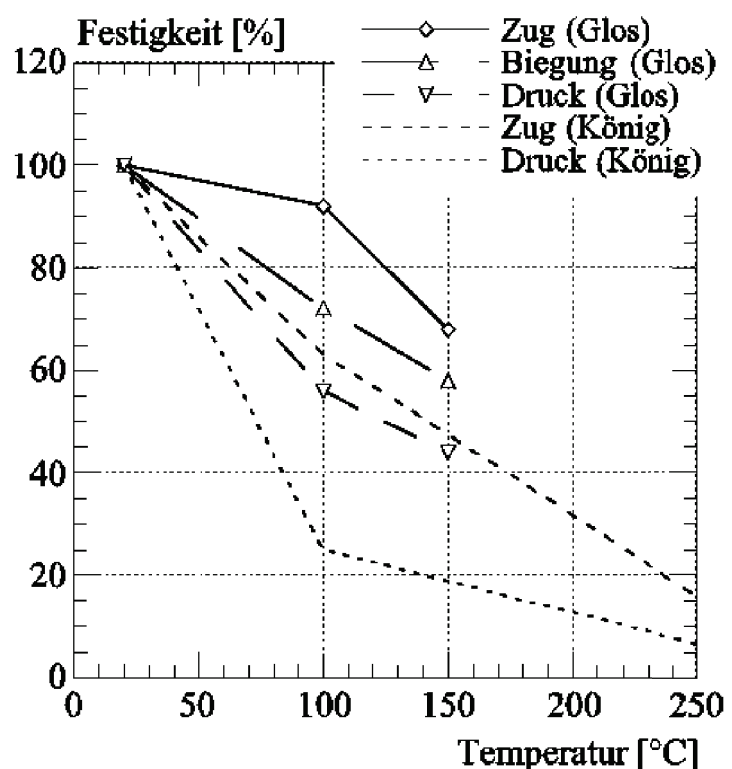


- ♦ Mittelwert Versuche
- FE-Modell (SAFIR)
- - Neuer Ansatz
- ... Holz-Brandschutz-Handbuch
- - - - - ENV 1995-1-2



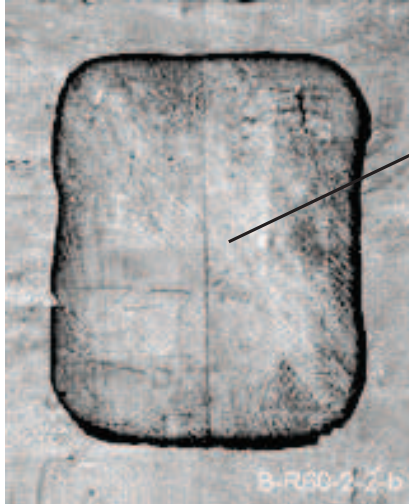
Festigkeit von Holz bei erhöhten Temperaturen

- Stark abhängig von der Prüfmethode
- Starker Einfluss von Feuchtigkeitsänderungen im Holzquerschnitt
- Festigkeitsabnahme nur im Bereich der Abbrandgrenze



Stärke vom Holz im Brandfall

- Kohleschicht schützt das innere Holz vor Wärmeeinwirkung



Restquerschnitt
- "kalt"
- tragfähig

Quelle: proHolz, Österreich

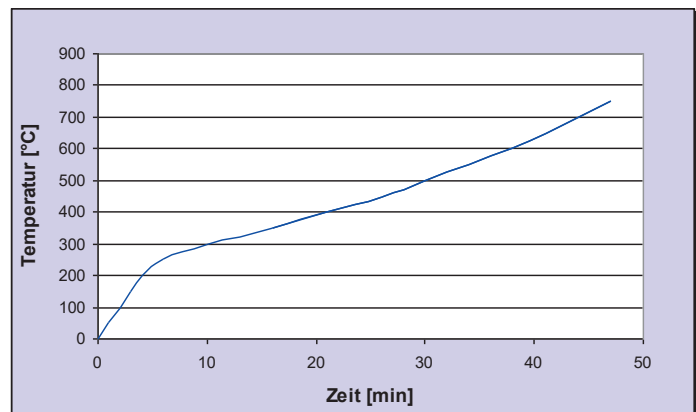


Stahl

Nicht brennbar aber schnell erwärmend

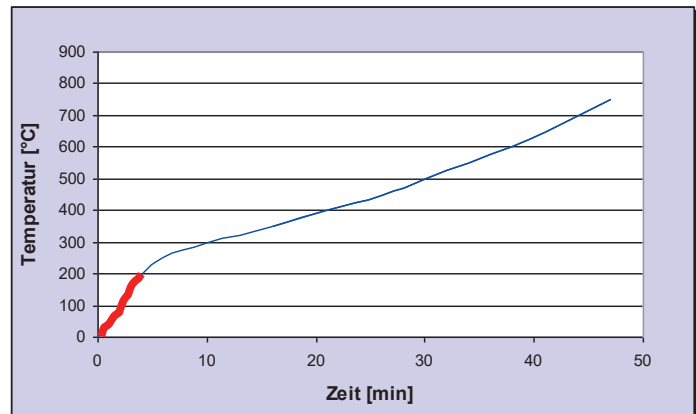
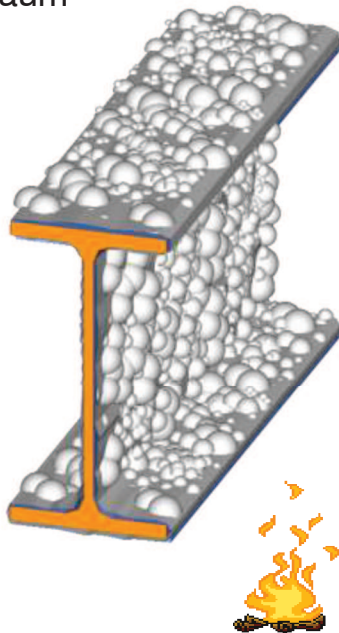
Dämmschichtbildende Brandschutzsysteme

- Wirkungsweise: bei Hitzeinwirkung, ab ca. 200°C (je nach Produkt) schäumt die Beschichtung auf und bildet einen festen, kompakten, wärmeisolierenden Schaum



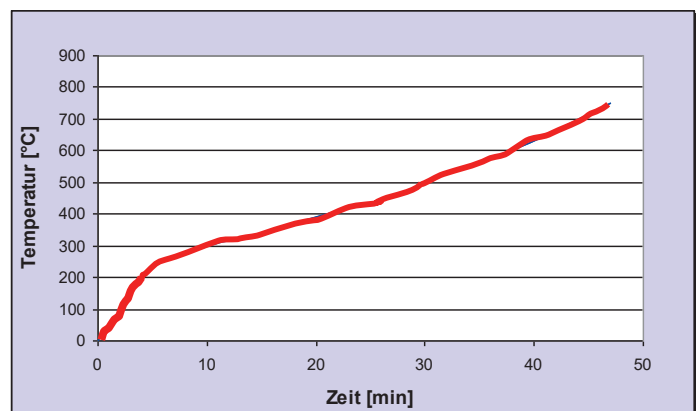
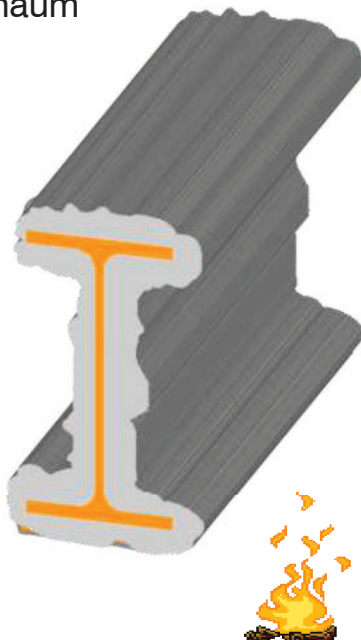
Dämmschichtbildende Brandschutzsysteme

- Wirkungsweise: bei Hitzeinwirkung, ab ca. 200°C (je nach Produkt) schäumt die Beschichtung auf und bildet einen festen, kompakten, wärmeisolierenden Schaum



Dämmschichtbildende Brandschutzsysteme

- Wirkungsweise: bei Hitzeinwirkung, ab ca. 200°C (je nach Produkt) schäumt die Beschichtung auf und bildet einen festen, kompakten, wärmeisolierenden Schaum



Dämmschichtbildende Brandschutzsysteme

“Modern manmade
intumescent materials
applied to steel structural
elements are in essence an
attempt to replicate what
timber does naturally.”

Quelle:

Paper “Overview of design issues for tall timber
buildings”, I. Smith, A. Frangi, SEI 2/2008



Feuerwiderstand von Bauteilen aus Holz



Grundsätzliche Überlegungen:

- Wahl massiver Querschnitte
- Vergrößern der Querschnitte um Abbrand
- Verkleiden der Querschnitte mit nichtbrennbaren isolierenden Materialien



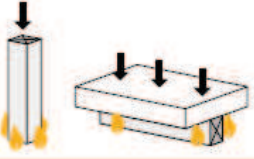
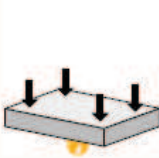


Anforderungen im Brandfall

- Anforderung an der Tragfähigkeit „R“
- Anforderung der Brandabschnittsbildung „EI“
 - kein Versagen der Rauchdichtigkeit durch Risse, Löcher oder andere Öffnungen, die gross genug sind, einen Feuerdurchgang in Form von Flammen oder heissen Gasen zu erlauben (Anforderung der Rauchdichtigkeit “E”)
 - kein Versagen der thermischen Isolierung durch Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgewandten Seite über vereinbarte Grenzen hinaus (Anforderung der thermischen Isolierung “I”)



Anforderungen im Brandfall

	Bezeichnung	Brandeinwirkung	Lineare Bauteile	Flächige Bauteile	
			Stütze/Träger	Wand	Decke
R	Tragend, nicht brandabschnittsbildend	gleichzeitig von mehreren Seiten			
EI	Nicht tragend, brandabschnittsbildend	von einer Seite			
REI	Tragend, brandabschnittsbildend	von einer Seite			

Dichtigkeit brandabschnittsbildender Bauteile

Durchbrand nach 50 Minuten Brandeinwirkung einer nicht abgedeckten Decke aus Brettstapel

 rathoblaas

Fugentypen zwischen Hohlkastenelementen



Restquerschnitt nach 60 Minuten Brandeinwirkung



Dichtigkeit brandabschnittsbildender Bauteile

➔ Grundsätzliche Überlegungen

- Fugen hinterlegen
- Hohlräume stopfen
- Mehrschichtiger Aufbau
- Abdeckungen, Beplankungen, Verkleidungen

➔ Günstige Bauteile im Brandfall

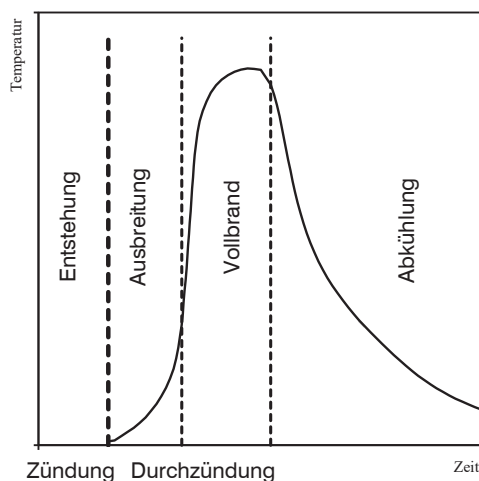
- Holz-Beton-Verbundbauteile
- Flächige Vollholzbauteile



Grundlagen zur Brandbemessung

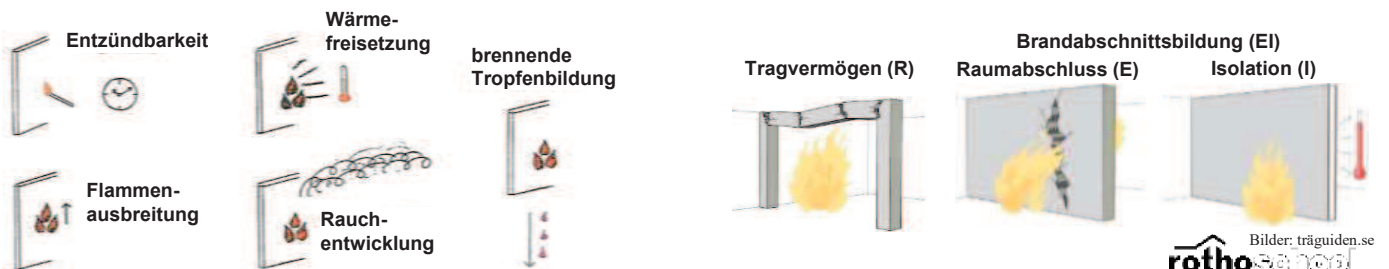
Brandverhalten

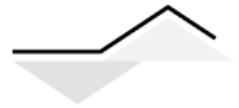
- Nicht-lineare Klassen A bis D (F)
- 3 verschiedene Prüfungen
- Prüfung am Endprodukt
- Keine reine Materialeigenschaft
- Holz i.d.R. Klasse D
- Holzwerkstoffe nie unbrennbar



Brandwiderstand

- Alle Oberflächen der gleichen Beanspruchung ausgesetzt
- Brandraumtemperatur abhängig von Wärmeträgheit und Sauerstoffzufuhr
- Brandraumtemperatur nicht abhängig von Brennbarkeitsklasse
- Branddauer abhängig von Brandlast (CLT?)





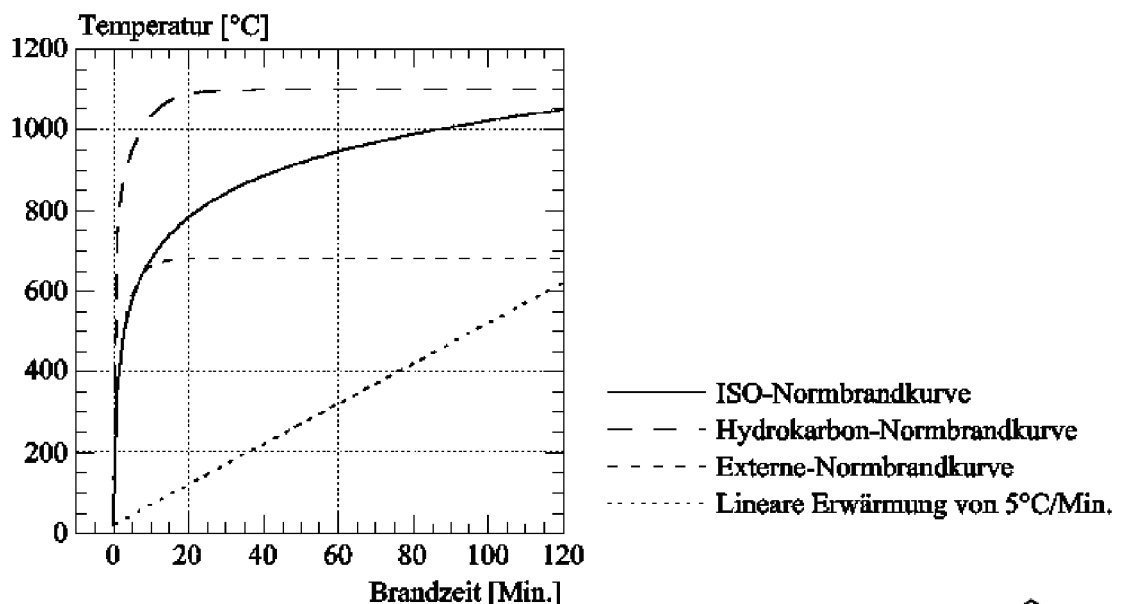
Thermische Einwirkungen im Brandfall

- Einflussparameter auf den Temperaturverlauf in einem Brandraum
 - Brandlast (Art und Menge)
 - Ventilationsverhältnisse (Fenster und Türöffnungen)
 - Umgebungsbauteile (Wände, Decke, Boden)
 - Löschmassnahmen
- Temperaturzeitkurven
 - Nominelle Temperaturzeitkurven
 - Parametrische Temperaturzeitkurven
 - Naturbrandmodelle



Thermische Einwirkungen im Brandfall

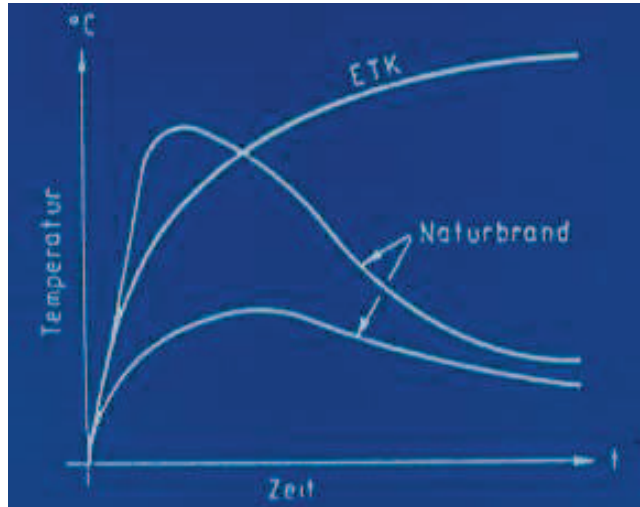
- Nominelle Temperaturzeitkurven
 - z.B. Einheitstemperaturkurve (ETK) (ISO-Normbrandkurve)





Thermische Einwirkungen im Brandfall

- Parametrische Temperaturzeitkurven
 - z.B. nach EN 1991-1-2 Anhang A
- Naturbrandmodelle
 - Zonen Modelle
 - CFD-Modelle



Mechanische Einwirkungen im Brandfall

- Brand: aussergewöhnliche Einwirkung, die selten oder nie während der Lebensdauer eines Tragwerkes auftritt
- Bemessungswert der Beanspruchung im Brandfall gemäss EN 1990

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Reduktion der Nutzlasten für die Brandbemessung
 - Lastfaktor $\psi_2 = 0.3$ für Gebäude der Kategorie A (Wohnbauten) bzw. B (Büros) gemäss EN 1990



Nachweis des Feuerwiderstandes von Holztragwerken

- Berechnungsart
 - Berechnung des gesamten Tragwerks
 - Berechnung von Teilen des Tragwerks
 - Bauteilberechnung
- Nachweisverfahren
 - Geprüfte und zugelassene Bauteile
 - Rechnerischer Nachweis gemäss EN 1995-1-2
 - Rechnerischer Nachweis für objektbezogene Konzepte



Bemessungsmethoden gemäss EN 1995-1-2

- Gleiche Nachweise wie bei Normaltemperatur, jedoch mit
 - den Bemessungswerten der Einwirkungen gemäss EN 1990
 - den Festigkeiten gemäss EN 1995-1-2

- Nachweis der Tragsicherheit im Brandfall

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi}$$

- Vereinfachend darf im Holzbau für Wohn- und Bürogebäude $E_{d,fi} = 0.6 \cdot E_d$ angenommen werden



Bemessungsmethoden gemäss EN 1995-1-2

- Bemessungswert des Tragwiderstandes im Brandfall $R_{d,fi}$

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

20 %
Fraktilwert
der Festigkeit

Modifikationsfaktor
(Einfluss der Temperatur)

Widerstandsbeiwert = 1.0

$$f_{20} = k_{fi} f_k$$

z.B. $k_{fi} = 1.25$ für Vollholz

$k_{fi} = 1.15$ für BSH

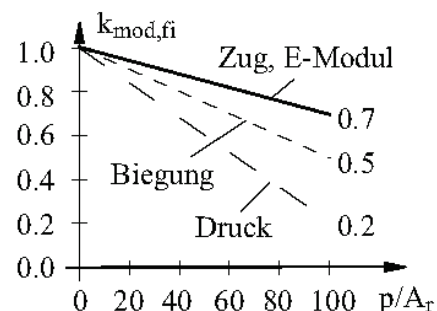
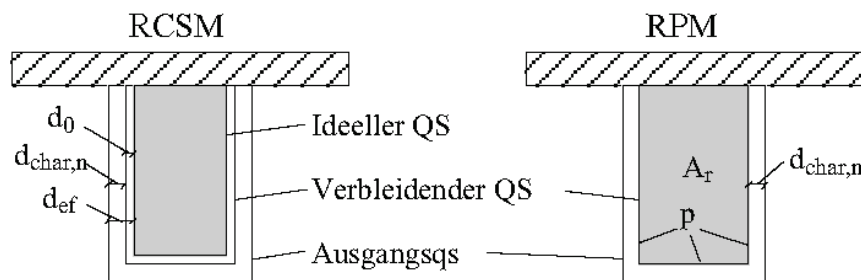


Bemessungsmethoden gemäss EN 1995-1-2

- Vereinfachte Berechnungsmethoden gemäss EN 1995-1-2
 - mit reduziertem Querschnitt
(auf englisch als „Reduced cross-section method“ RCSM genannt)
 - mit reduzierten Eigenschaften
(auf englisch als „Reduced properties method“ RPM genannt)



Bemessungsmethoden gemäss EN 1995-1-2



$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

$$k_{mod,fi} = f(p/A_r)$$

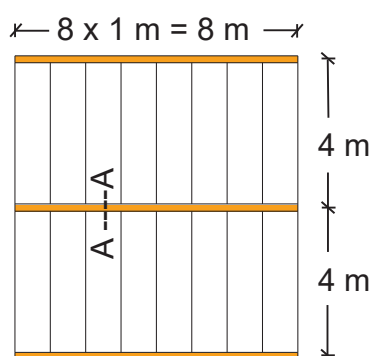
$$k_{mod,fi} = 1.0$$

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{20} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot f_k$$

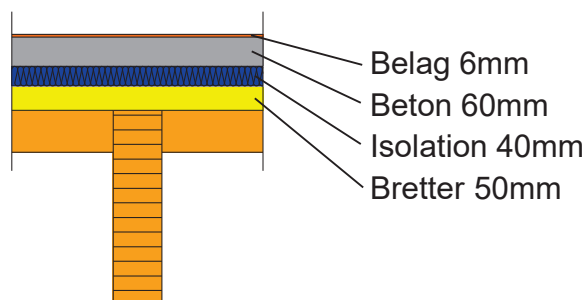
$$f_{d,fi} = f_{20} = k_{fi} \cdot f_k$$



Berechnungsbeispiel



Schnitt A-A



1. Einwirkungen 1.1 Auflasten

Belag	0.09 kN/m ²
Beton	1.32 kN/m ²
Isolation	0.06 kN/m ²
Bretter	0.28 kN/m ²
g_B	1.75 kN/m²
Zwischenwände	1.00 kN/m ²

1.2 Eigenlasten	Sekundärträger	260/120 a=1m => 0.17 kN/m ²
	Hauptträger	735/160 a=4m => 0.17 kN/m ²

1.3 Nutzlasten	Wohnen	q = 2.0 kN/m ²
-----------------------	--------	---------------------------

Berechnungsbeispiel

2. Sekundärträger – Feuerwiderstand R 30

KH 120/260 (C24) $\Rightarrow$ Abbrand 0.8 mm/min

dreiseitige Beanspruchung $t_{fi,erf} = 30$ min

$$b_{fi} = 120 - 2 \cdot (30 \cdot 0.8 + 7) = 58 \text{ mm}$$

$$h_{fi} = 260 - (30 \cdot 0.8 + 7) = 229 \text{ mm}$$

$$W_{fi} = 506.93 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

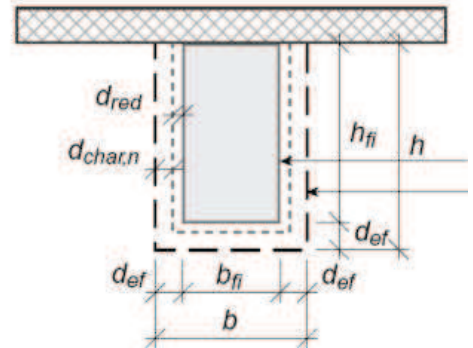
$$f_{m,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot f_{m,k} = 1.0 \cdot 1.25 \cdot 24 = 30.0 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{d,fi} = \frac{(1.75 + 1.0 + 0.17 + 0.3 \cdot 2) \cdot 4^2}{8} = 7.04 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{d,fi} = \frac{M_{d,fi}}{W_{fi}} = 13.9 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d,fi}$$

(für $t_{fi,erf} = 60$ min wäre $\sigma_{d,fi} = 101 \text{ N/mm}^2$)

a) Dreiseitiger Abbrand



Berechnungsbeispiel

3. Hauptträger – Feuerwiderstand R 30

BSH 160/735 (GL24h) $\Rightarrow$ Abbrand 0.7 mm/min

dreiseitige Beanspruchung $t_{fi,erf} = 30$ min

$$b_{fi} = 160 - 2 \cdot (30 \cdot 0.7 + 7) = 104 \text{ mm}$$

$$h_{fi} = 735 - (30 \cdot 0.7 + 7) = 707 \text{ mm}$$

$$W_{fi} = 8664 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

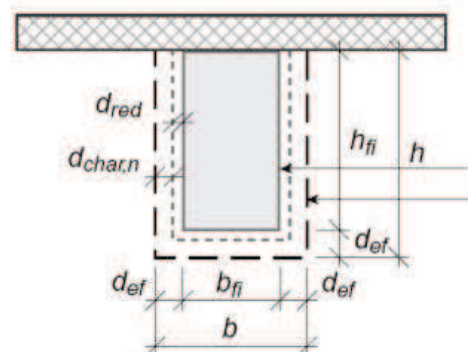
$$f_{m,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot f_{m,k} = 1.0 \cdot 1.15 \cdot 24 = 27.6 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{d,fi} = \frac{14.76 \cdot 8^2}{8} = 118.08 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{d,fi} = \frac{M_{d,fi}}{W_{fi}} = 13.6 \text{ N/mm}^2 < f_{m,d,fi}$$

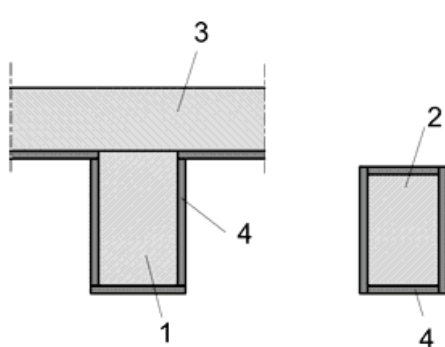
(für $t_{fi,erf} = 60$ min wäre $\sigma_{d,fi} = 24.3 \text{ N/mm}^2$)

a) Dreiseitiger Abbrand



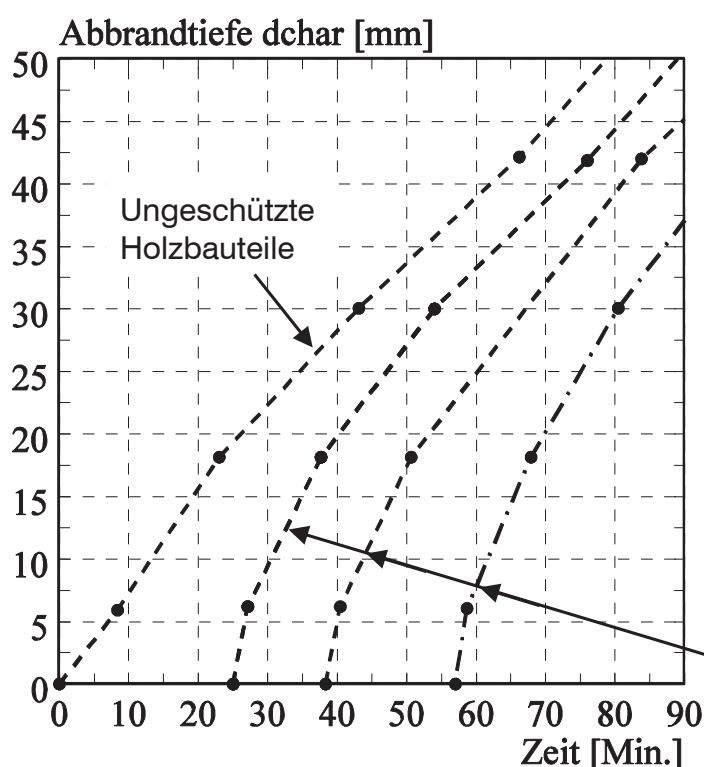
Feuerwiderstand von Holzbauteilen

- Ungeschützte Holzbauteile
 - Bemessungsmethode gemäss EN 1995-1-2
- Geschützte Holzbauteile
 - Bemessungsmethode mit unterschiedlichen Brandphasen gemäss EN 1995-1-2

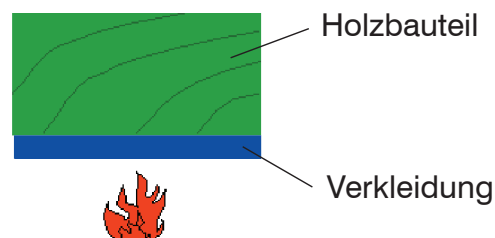


- 1 Balken
- 2 Stütze
- 3 Decke
- 4 Verkleidung

Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen

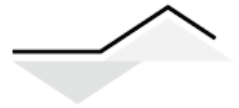


- Abbrandgeschwindigkeit nicht mehr konstant über die Zeit
- Erhöhter Abbrand nach der Versagen der Verkleidung



Geschützte Holzbauteile

Einfluss der Verkleidung

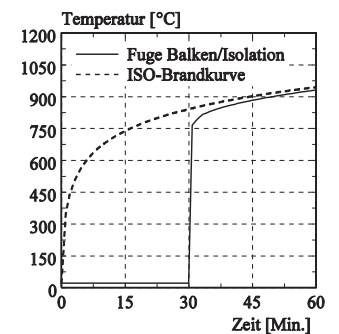
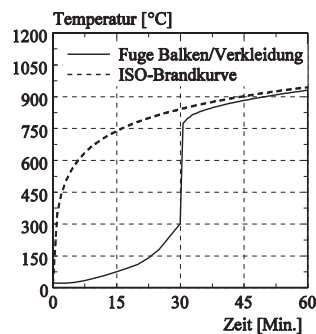
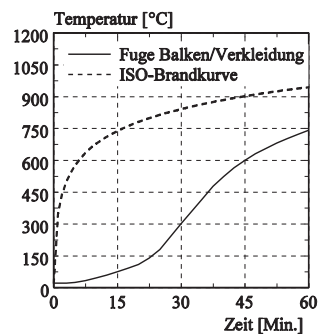
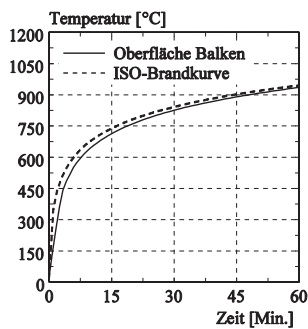
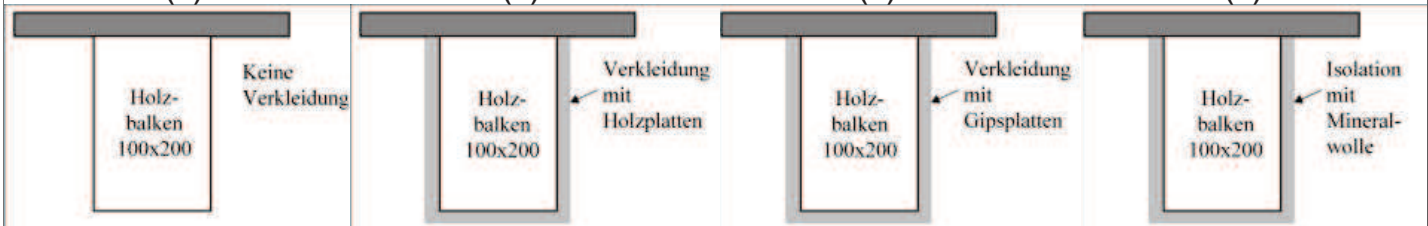


Fall (1)

Fall (2)

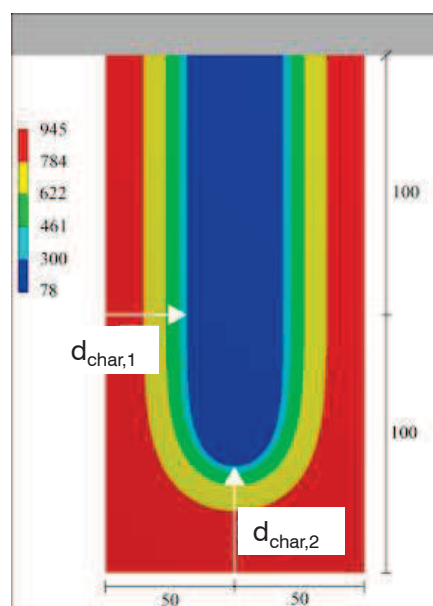
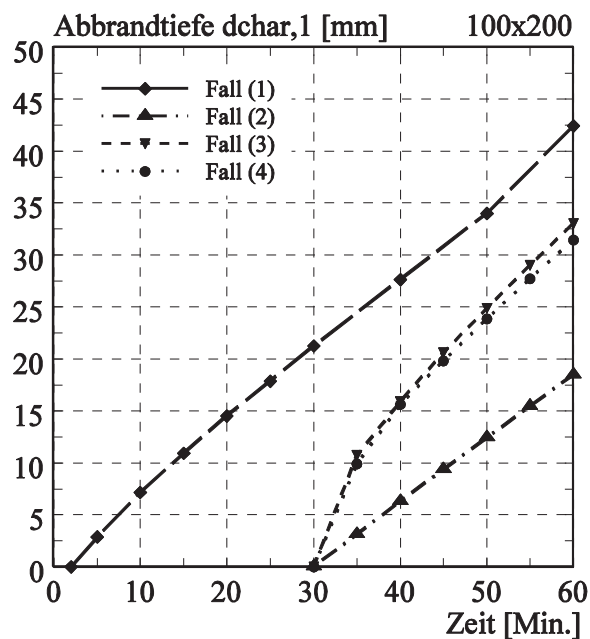
Fall (3)

Fall (4)



Parameter	Fall (1)	Fall (2)	Fall (3)	Fall (4)
Vorerwärmung	nein	ja	Ja	nein
Hohe Temperaturen	nein	ja	ja	ja
Holzkohleschicht	nein	ja	nein	nein

Einfluss der Verkleidung



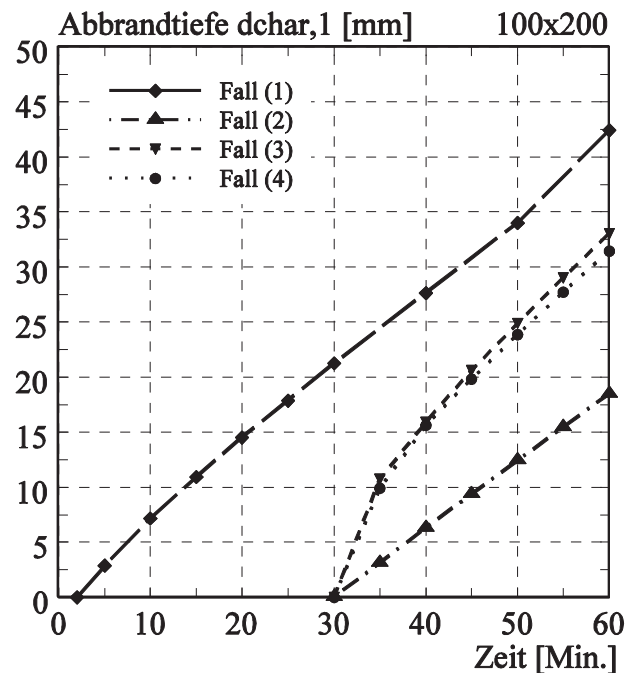
Parameter	Fall (1)	Fall (2)	Fall (3)	Fall (4)
Vorerwärmung	nein	ja	ja	nein
Hohe Temperaturen	nein	ja	ja	ja
Holzkohleschicht	nein	ja	nein	nein



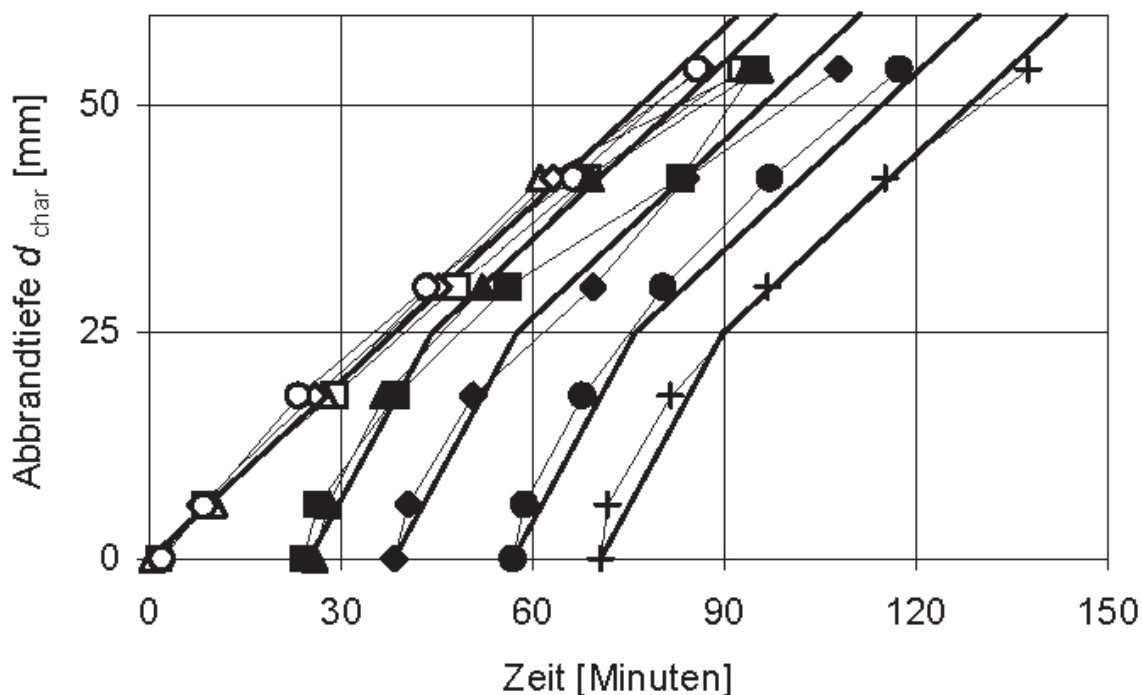
Einfluss der Verkleidung

■ Schlussfolgerungen

- Erklärung für den erhöhten Abbrand nach Versagen der Verkleidung ist
 - die fehlende Schutzwirkung der Holzkohle
 - die hohen Temperaturen im Brandraum
- Einfluss der Vorerwärmung ist nicht signifikant!



Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen

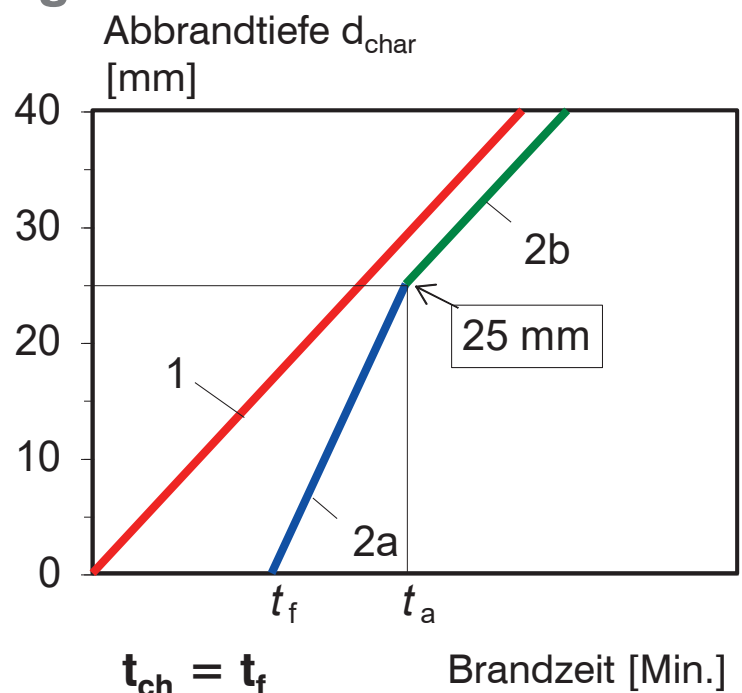


Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen: Bemessungsmethode gemäss EN 1995-1-2

- Unterschiedliche Brandphasen sind durch folgende Zeiten charakterisiert:
 - t_{ch} : die Zeit bis zum Beginn des Abbrandes des Bauteils
 - t_f : die Zeit bis zum Versagen der Brandschutzbekleidung
 - t_a : die Zeit ab der die ideale Abbrandgeschwindigkeit β_n wieder angenommen werden kann
- Versagen von Brandschutzbekleidungen
 - Abbrand oder mechanischer Abbau des Bekleidungsmaterials
 - unzureichende Verankerungslänge der Verbindungsmittel im unverkohlten Bauholz

Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen: Bemessungsmethode gemäss EN 1995-1-2

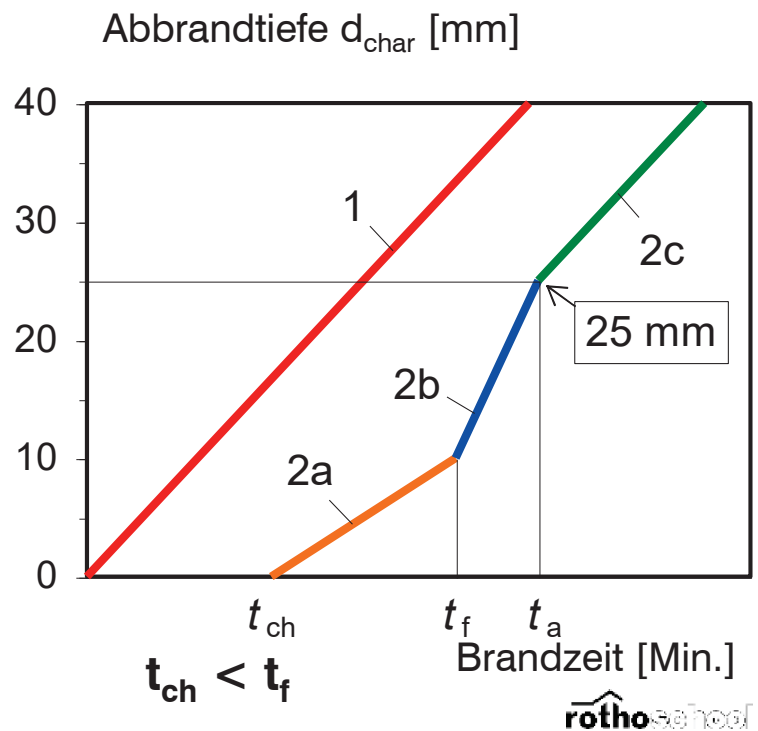
- **Phase 2a)**
Nach dem Abfall der Brandschutzbekleidung t_f beginnt der Abbrand mit doppelter Abbrandgeschwindigkeit ($\beta_{2a} = 2 \cdot \beta_n$)
- **Phase 2b)**
Nach dem Erreichen einer Abbrandtiefe von 25 mm reduziert sich die Abbrandgeschwindigkeit auf die normalen Werte ($\beta_{2b} = \beta_n$)





Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen: Bemessungsmethode gemäss EN 1995-1-2

- **2a)** Der Abbrand beginnt bei t_{ch} mit einer abgeminderten Abbrandgeschwindigkeit, solange die Brandschutzbekleidung noch intakt ist ($\beta_{2a} < \beta_n$).
- **2b)** Nach dem Abfall der Brandschutzbekleidung t_f beginnt der Abbrand mit doppelter Abbrandgeschwindigkeit ($\beta_{2b} = 2 \cdot \beta_n$)
- **2c)** Nach dem Erreichen einer Abbrandtiefe von 25 mm reduziert sich die Abbrandgeschwindigkeit auf ($\beta_{2c} = \beta_n$)



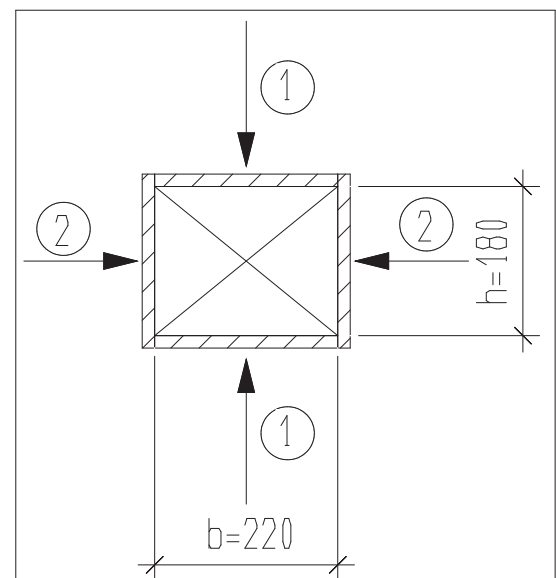
Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen: Beispiel

Gegeben:

- Stütze freistehend (R60)
- Vierseitig mit GK (18 mm) bekleidet
- BSH GL 24h
- 180mm x 220mm
- Feuchtekasse 1
- Bauteil vor Witterung geschützt

Gesucht:

Ideeller Restquerschnitt der Stütze nach 60 Minuten Brandeinwirkung



Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen

Feuerwiderstand über Bekleidung + 4-seitigen Abbrand.

Die Bekleidung schützt den Balken während 30 Min. vor der Brandeinwirkung.

Abbrand: $t_{fi,erf} = 60' - 30' = 30'$

Höhe h_{fi} : (Abbrandrichtung 1)

$\beta_n = 0.7 \text{ mm/min}$

$d_{ef} = d_{char,n} + d_{red}$
 $= 1.4 \text{ mm/Min} * 15 \text{ Min} + 0.7 \text{ mm/Min} * 15 \text{ Min} + 7 \text{ mm} = 38.5 \text{ mm}$

$h_{fi} = h - (2 * d_{ef}) = 180 \text{ mm} - (2 * 38.5 \text{ mm}) = \underline{103 \text{ mm}}$

Breite b_{fi} : (Abbrandrichtung 2)

$d_{ef} = d_{char,n} + d_{red}$
 $= 1.4 \text{ mm/Min} * 15 \text{ Min} + 0.7 \text{ mm/Min} * 15 \text{ Min} + 7 \text{ mm} = 38.5 \text{ mm}$

$b_{fi} = b - d_{ef} = 220 \text{ mm} - (2 * 38.5 \text{ mm}) = \underline{143 \text{ mm}}$

Der ideale Restquerschnitt beträgt: $b_{fi} * h_{fi} = \underline{143 \text{ mm} \times 103 \text{ mm}}$

Abfallen der Holzkohle

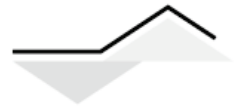
3-Schichtplatte

OSB-Platte

Einfluss des mehrschichtigen Aufbaues

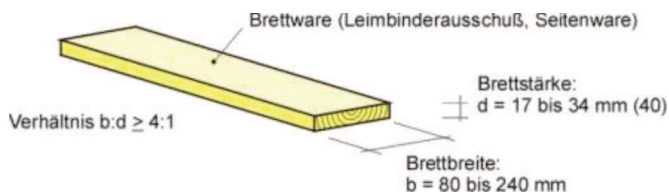
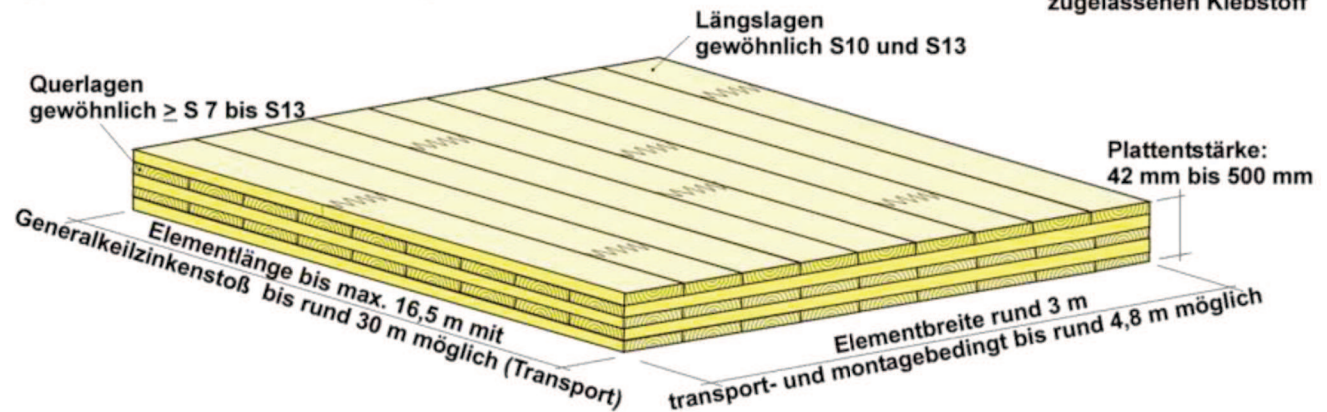
Holzdecke nach 17 Minuten Brandeinwirkung, Horizontalofen EMPA

Brettsperrholz



Brettsperrholzplatte (BSP): Kombination von längs- und querorientierten Einschichtplatten

flächige Verklebung der Einschichtplatten mit einem zugelassenen Klebstoff



➔ Unterschiede zum Vollholz

- Mehrschichtiger Aufbau
- Fugen / Stöße

Grundsätzliche Überlegungen

Vorteile

- Massive Bauweise
- Robustheit

Nachteile

- Vergrößerung der Brandlast
- Mehrschichtiger Aufbau

Abbrandgeschwindigkeit gemäss EN 1995-1-2

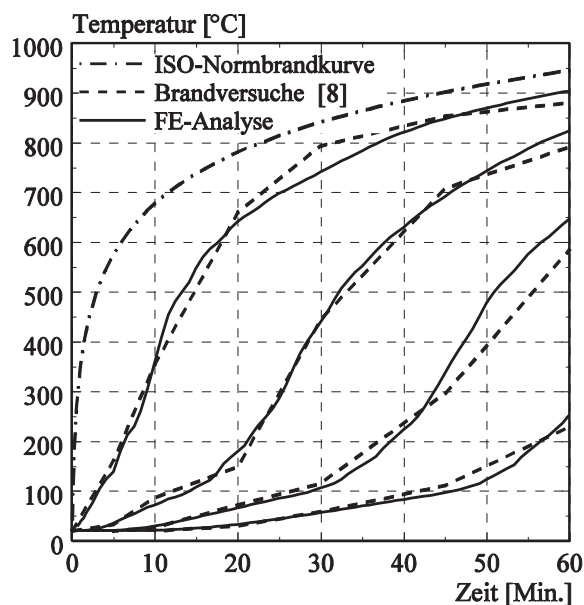
Holzart	β_0 [mm/Min.]	β_n [mm/Min.]
Nadelholz und Buche		
BSH mit einer charakt. Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.7
Vollholz mit einer charakt. Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0.65	0.8
Platten		
Holzbekleidungen	-	0.9
Sperrholz	-	1.0
Holzwerkstoffplatten ausser Sperrholz	-	0.9

➡ Abbrandgeschwindigkeit Brettsper Holzplatten?

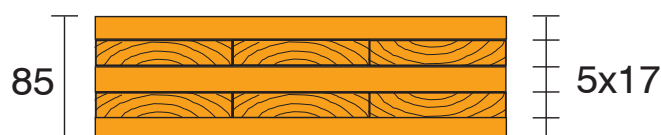
Grenzwerte: $0.65 \text{ mm/Min.} \leq \beta_n \leq 1.0 \text{ mm/Min.}$

FE-thermische Untersuchungen

- Mehrere FE-thermische Untersuchungen zum Brandverhalten von Brettsper Holzplatten



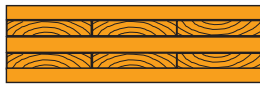
Beispiel 1



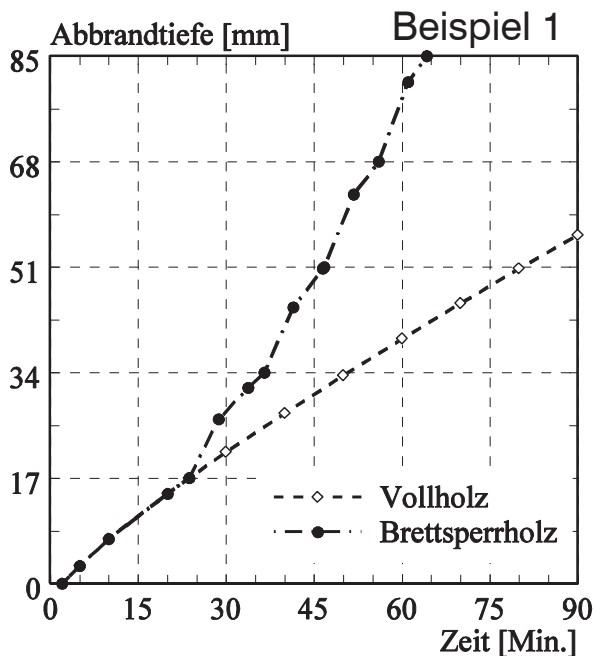
Beispiel 2



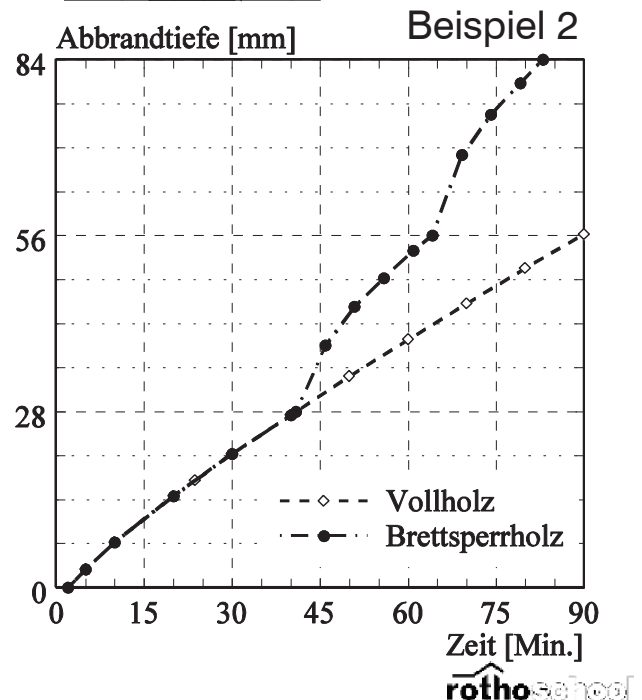
FE-thermische Untersuchungen



$\beta_n = 1.3 \text{ mm/Min.}$



$\beta_n = 1.0 \text{ mm/Min.}$



FE-thermische Untersuchungen

■ Schlussfolgerungen

- Abbrandgeschwindigkeit von Brettsperrholzplatten nicht mehr konstant über die Zeit
- Erhöhung der Abbrandgeschwindigkeit nach dem Ablösen der verkohlten einzelnen Bretterlagen
- Grosser Einfluss der Dicke und Anzahl der Bretterlagen auf das globale Brandverhalten der Brettsperrholzplatte
- Brettsperrholzplatte mit 3x28 mm dicken Schichten besser als Brettsperrholzplatte mit 5x17mm dicken Schichten

Brandversuche mit Brettsperrholz (CLT)

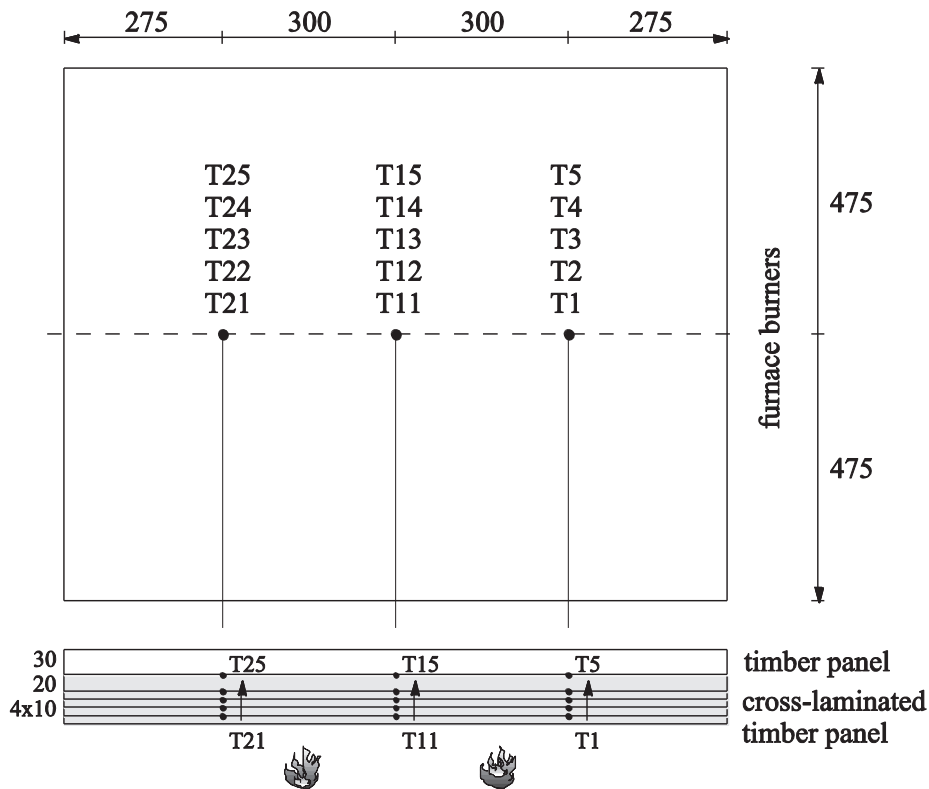
CLT – nach Brandeinwirkung von 55 Minuten (ISO 834)



Kleinmassstäbliche Brandversuche mit CLT

Brand-versuch	Anzahl Schichten	Dicke der Schichten [mm]	Gesamtdicke [mm]	Klebstoff	Orientierung der Schichten
V1	5	10/10/10/10/20	60	MUF	kreuzweise
V2	5	10/10/10/10/20	60	PU 1	kreuzweise
V3	5	10/10/10/10/20	60	PU 1	parallel
V4	2	30/30	60	PU 1	kreuzweise
V5	2	30/30	60	MUF	kreuzweise
V6	5	10/10/10/10/20	60	PU 2	kreuzweise
V7	5	10/10/10/10/20	60	PU 3	kreuzweise
V8	3	20/20/20	60	PU 3	kreuzweise
V9	5	10/10/10/10/20	60	PU 4	kreuzweise
V10	3	20/20/20	60	PU 4	kreuzweise
V11	3	20/20/20	60	PU 5	kreuzweise

Kleinmassstäbliche Brandversuche mit CLT



Falling off of the first charred layer

Second layer directly
exposed to fire

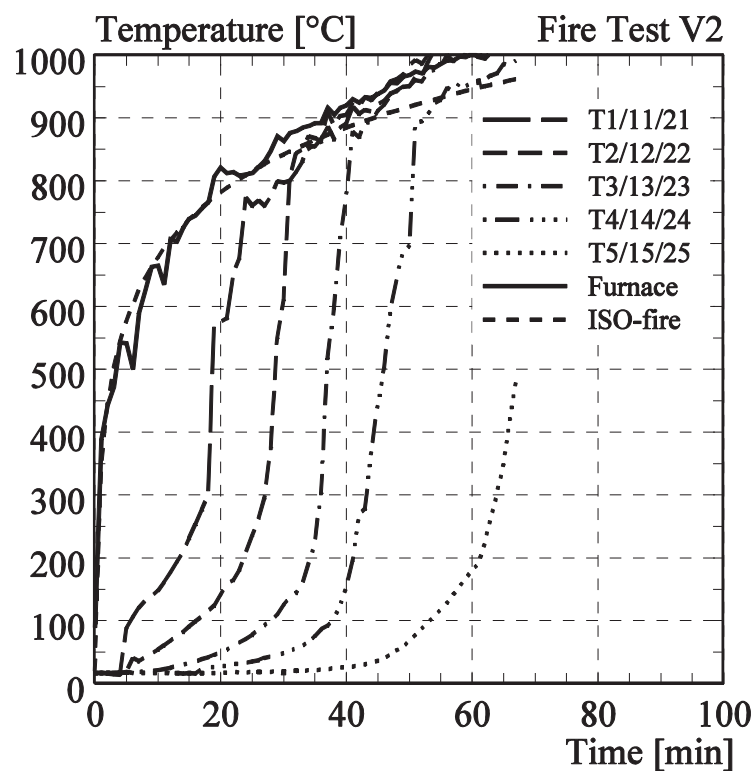


Wire of thermocouple
directly exposed to fire

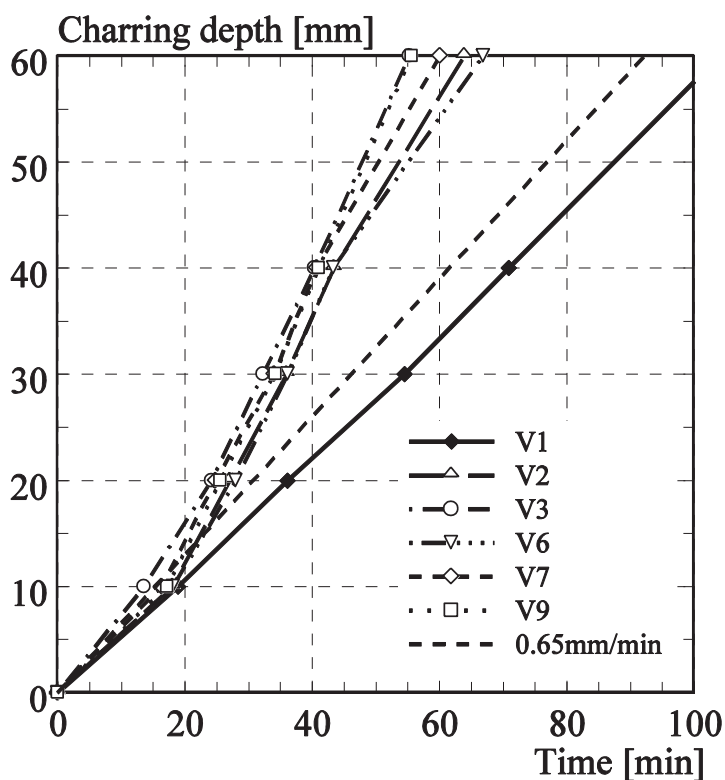
Second layer directly
exposed to fire



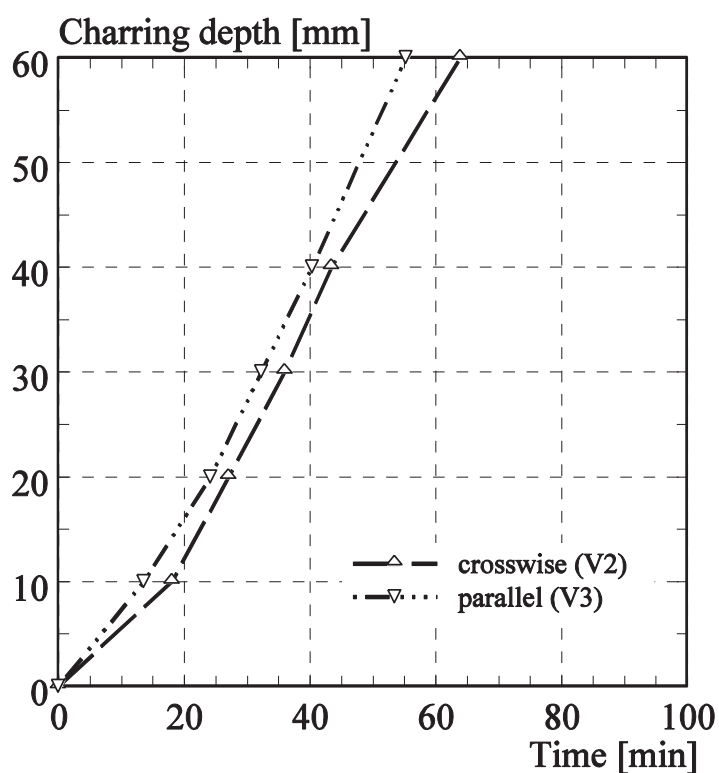
Kleinmassstäbliche Brandversuche mit CLT



Kleinmassstäbliche Brandversuche mit CLT



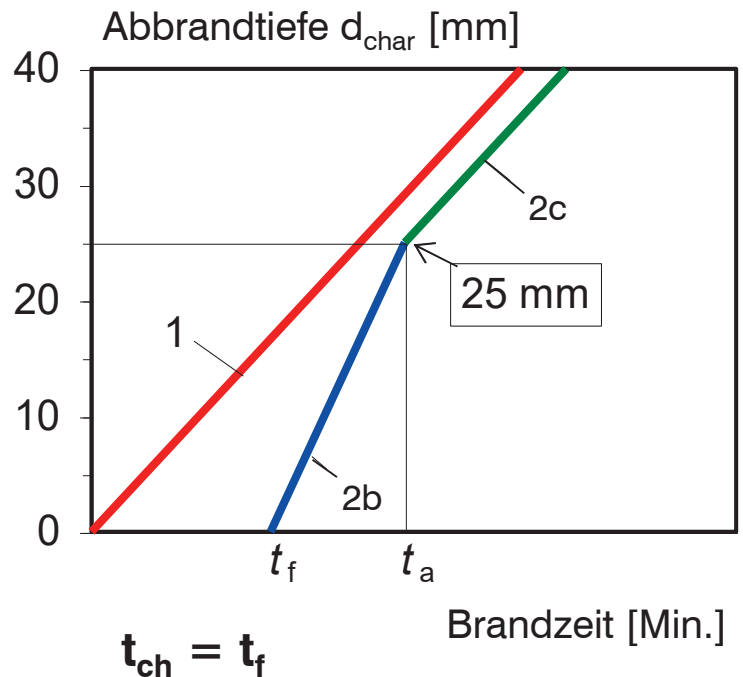
Kleinmassstäbliche Brandversuche mit CLT



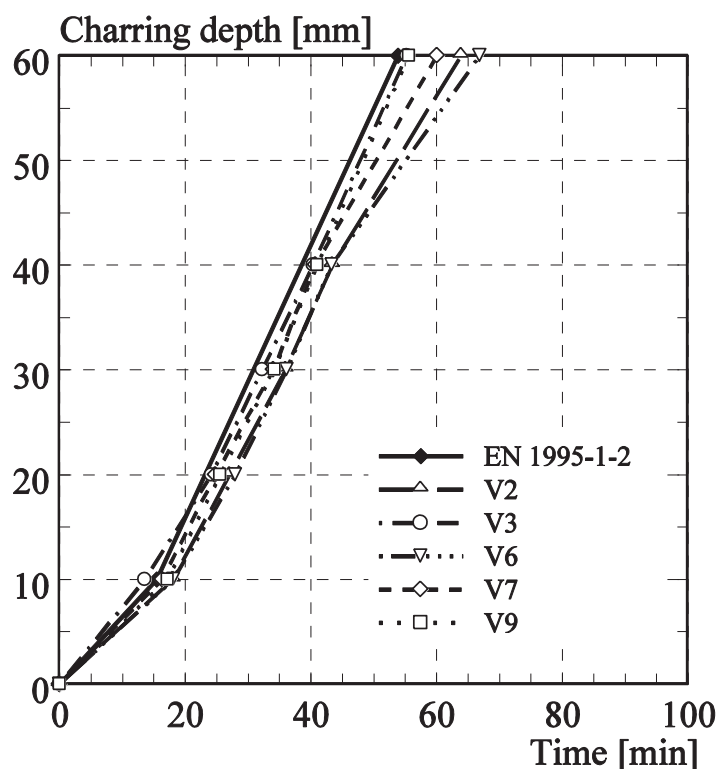


Brandverhalten von geschützten Holzbauteilen nach EN 1995-1-2

- **Phase 2b)**
Nach dem Abfall der Brandschutzbekleidung t_f beginnt der Abbrand mit doppelter Abbrandgeschwindigkeit ($\beta_{2b} = 2 \cdot \beta_n$)
- **Phase 2c)**
Nach dem Erreichen einer Abbrandtiefe von 25 mm reduziert sich die Abbrandgeschwindigkeit auf die normalen Werte ($\beta_{2c} = \beta_n$)



Vergleich mit EN 1995-1-2





Schlussfolgerungen

- Ablösen der einzelnen Schichten nach dem Durchbrand effektiv beobachtet
- Ablösen der einzelnen Schichten durch den Klebstoff und die Dicke der einzelnen Schichten stark beeinflusst
- Erhöhung der Abbrandgeschwindigkeit nach dem Ablösen der verkohlten einzelnen Schichten
- Berechnungsmodelle für geschützte Bauteile könnten vereinfacht verwendet werden, um den erhöhten Abbrand zu berücksichtigen



Schlussfolgerung - Fragestellung

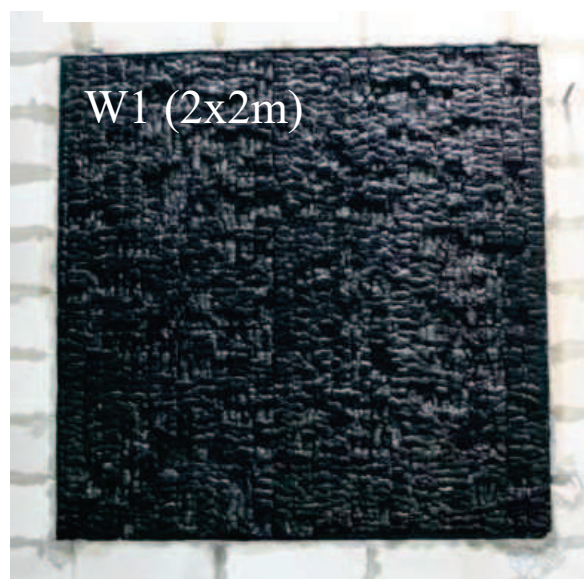
- 1) Ablösen der einzelnen Schichten nach dem Durchbrand nur bei horizontalen Elementen (Decken)
- 2) Ist der Effekt des Abfallens für die Bemessung im Brandfall signifikant?

Ist der Effekt des Abfallens signifikant?

“Taking into account that the second layer on the fire exposed side is usually statically ineffective, for common CLT panels with the thickness of the single boards in the range of 20 to 35mm the effect of falling off of charred layers on the load-carrying capacity in fire is therefore relative small.”

A. Frangi et al. / Fire Safety Journal 44 (2009) 1078–1087

Weitere Untersuchungen



Wand	Plattenaufbau	Branddauer [Min.]	d_{char} [mm]	β [mm/Min.]
W1	5x17mm = 85 mm	66	42.5	0.64
W2	3x28mm = 84 mm	39	26.5	0.68

Estratto rapporti di prova / Abstract report test

Test report	N. Sample	Thickness (mm)	Load (kN)	Coating	Loadbearing capacity	Integrity	Insulation	Charring rate (mm/min)	Possible Classification
TesiLFV001-04-2010	LFV001	150	100	no	no failure	129 (sustained flaming)	no failure	longitudinal dir.: 0,78 transverse dir.: 0,81	REI 120
TesiLFV002-01-2010	LFV002	95	50	no	no failure	95 (sustained flaming)	no failure	longitudinal dir.: 0,59 transverse dir.: 0,64	REI 90
TesiLFV003-03-2010	LFV003	95	100	no	no failure	60 (sustained flaming)	no failure	longitudinal dir.: 0,62 transverse dir.: 0,64	REI 60
TesiLFV004-02-2010	LFV004	95	50	yes	no failure	115 (sustained flaming)	no failure	longitudinal dir.: 0,36 transverse dir.: 0,38	REI 90

Dimensioni provino/ Dimension specimen: (600 x 3300)mm

PERSONALE CHE HA SVOLTO LE PROVE / OPERATOR

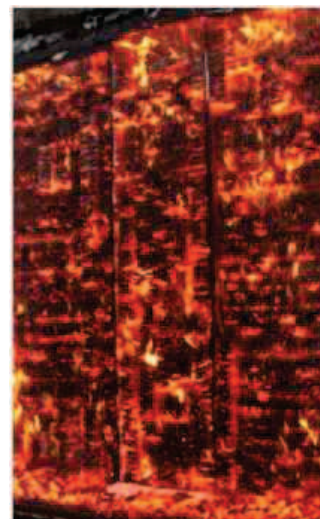
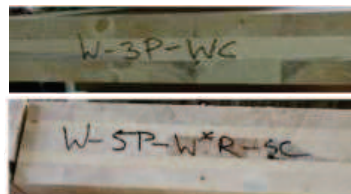
- R.T.LAB Mario Pinna
- T.LAB Diego Magnago

Redatto/ Written	Approvato / Approved
T.L.LAB – Barbara Tessadri	R.LAB Giovanna Boichichio

rothoblaas

Parameters investigated

- **Wall tests** with different type of connections as well as layer-configuration
- **Floor tests** with different type of layer-configuration
- Floor and wall tests **loaded** (12 large-scale fire tests)



rothoblaas

→ COST Action FP1404 WG2/TG1 (SP, CSTB, TUM, ETH, FPIInnovation) Weitere Untersuchungen (Datenbank Brandversuche)

Test	Type	# of plies	Thickness	Composition	Adhesive	Mean	Fire time	Failure Mode	Falling off	Protection	Furnace	Fire curve	Load	Charring rate	Panel dimension
[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[mm/min]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	1st layer	2nd layer
Fire tests of Frangi et al. (2008), [10]															
V1	W	3	27	9-9-9	PUR	0.78		Durchbrand	leicht	-	V-3s3	ISO			3.0 x 3.0
V2	W	3	27	9-9-9	PUR	0.78		Durchbrand	leicht	-	V-3s3	ISO			
V4	W	3	27	9-9-9	PUR	0.74		Durchbrand	leicht	-	V-3s3	ISO			
Slab	F	3	27	9-9-9	PUR	0.99		Durchbrand	ja	-	H-3s4.85	ISO			
V12	F	1	54	54	-	0.66	38	Durchbrand	ja	-	H-1s0.8	ISO			
	F	3	54	18-18-18	PUR	0.84	38	Durchbrand	ja	-	H-1s0.8	ISO			
	F	1	54	2 x 27	-	0.62	28	Durchbrand	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V13	F	3	54	2 x 9-9-9	PUR	1.05	28	Durchbrand	ja	-	H-1s0.8	ISO			
P1	W	5	85	5s17	PUR	0.64	66	-	nein	-	V-2s2	ISO			
P2	W	3	84	3s28	PUR	0.68	39	-	nein, Zeit zu kurz	-	V-2s2	ISO			
Fire tests of Frangi et al. (2009), [11]															
V1	F	5	60	10-10-10-10-20	MUF	0.58	104	-	nein	-	H-1s0.8	ISO			
V2	F	5	60	10-10-10-10-20	PU 1	0.94	64	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V3	F	5	60	10-10-10-10-20 (p)	PU 1	1.09	55	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V4	F	2	60	30-30	PU 1	0.80	75	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V5	F	2	60	30-30	MUF	0.61	98	-	nein	-	H-1s0.8	ISO			
V6	F	5	60	10-10-10-10-20	PU 2	0.90	67	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V7	F	5	60	10-10-10-10-20	PU 3	1.00	60	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V8	F	3	60	20-20-20	PU 3	0.85	71	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V9	F	5	60	10-10-10-10-20	PU 4	1.08	56	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V10	F	3	60	20-20-20	PU 4	0.89	67	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			
V11	F	3	60	20-20-20	PU 5	0.76	79	-	ja	-	H-1s0.8	ISO			



Information about

- Type
- # of plies
- Thickness
- Panel dimension
- Composition
- Adhesive
- Charring rate
- Fire time
- Failure mode
- Falling off (yes/no)
- Protection (yes/no)
- Furnace
- Fire curve

Number of documented tests:

Wall tests: > 30

Floor tests: > 70

Grossmassstäblicher Brandversuch mit CLT (Empa)

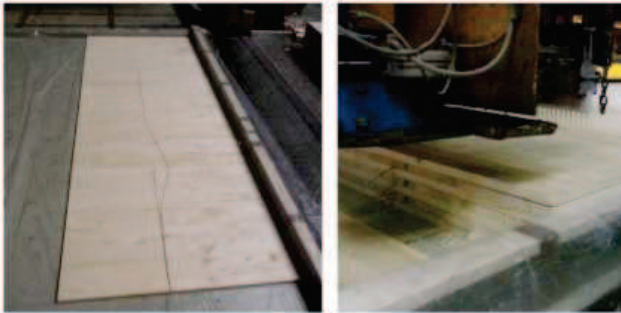


Details

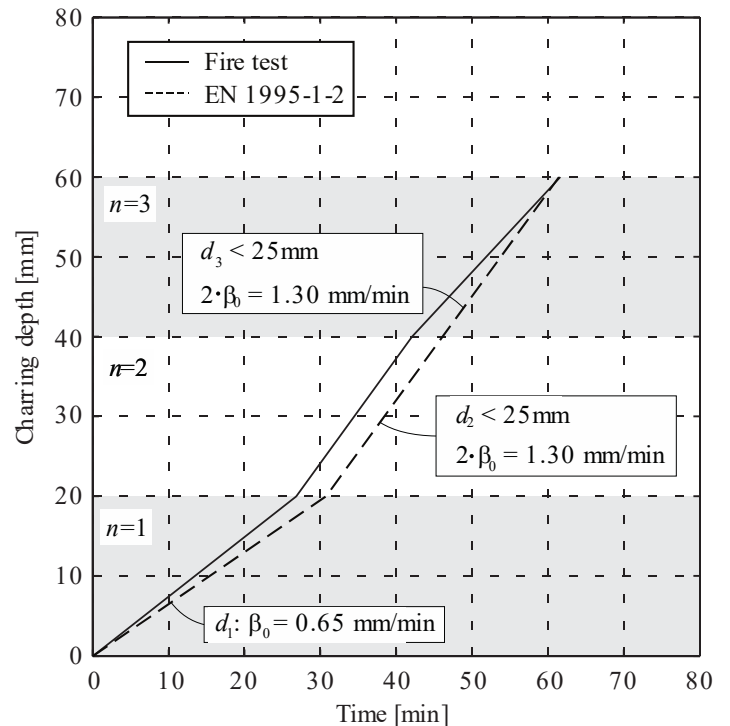
- ISO-Normbrandeinwirkung
- CLT-Decke: 200 x 2800 x 5350 [mm] (H x B x L)
- Vierpunkt-Biegeversuch



Grossmassstäblicher Brandversuch mit CLT (Empa)

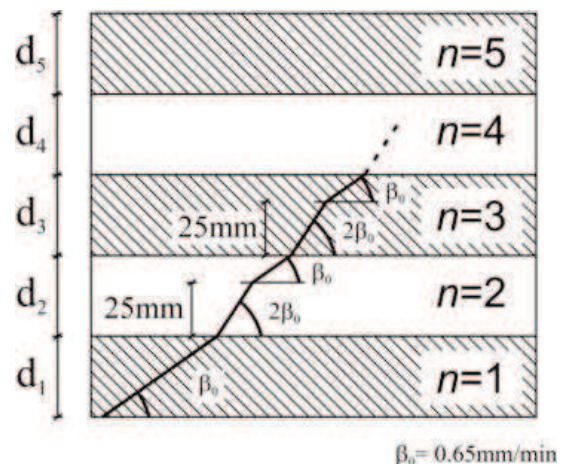


Bestätigung der Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen



Brandverhalten von Brettsperrholz

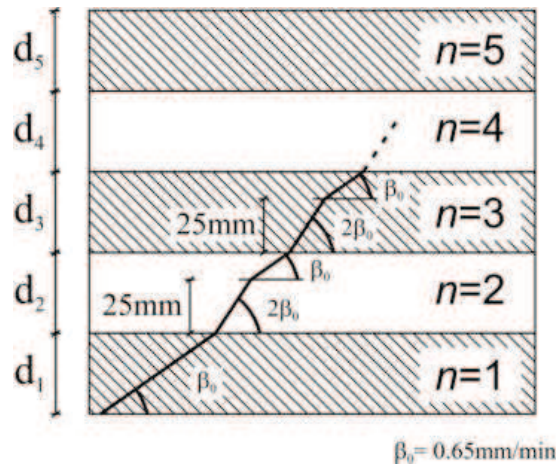
- Ergebnisse von Brandversuchen kritisch beurteilen
- Ablösen der verkohlten Schichten bei *Decken* ausgeprägter als bei *Wänden*
- Dünnere Schichten sind im Brandfall schlechter als dickere Schichten
- Erhöhung der Abbrandgeschwindigkeit nach dem Ablösen der verkohlten Schichten





Bemessung mit reduziertem Querschnitt

- 1) Ermittlung der Abbrandtiefe



- 2) Ermittlung der effektiven Abbrandtiefe

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 \cdot d_0$$



Brandbemessung nach EN 1995-1-2

- Bemessungsmethode mit reduziertem Querschnitt wurde für stabförmige Querschnitte entwickelt
- *“Simulating the reduction in beam cross section due to charring and assuming an additional layer of thickness (0.3 in. = 7.6 mm) has zero strength allows the time to failure under fire exposure to be estimated in a straightforward manner.”*



Strength Validation and Fire Endurance of Glued-Laminated Timber Beams

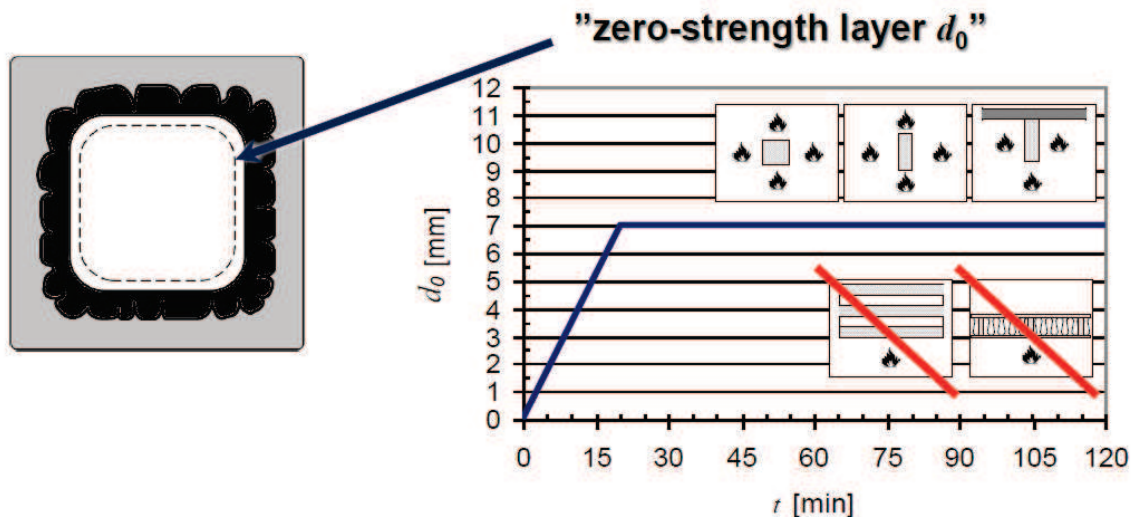
Erwin L. Schaffer
Calvin M. Marx
Donald A. Bender
Frank E. Woeste



1986

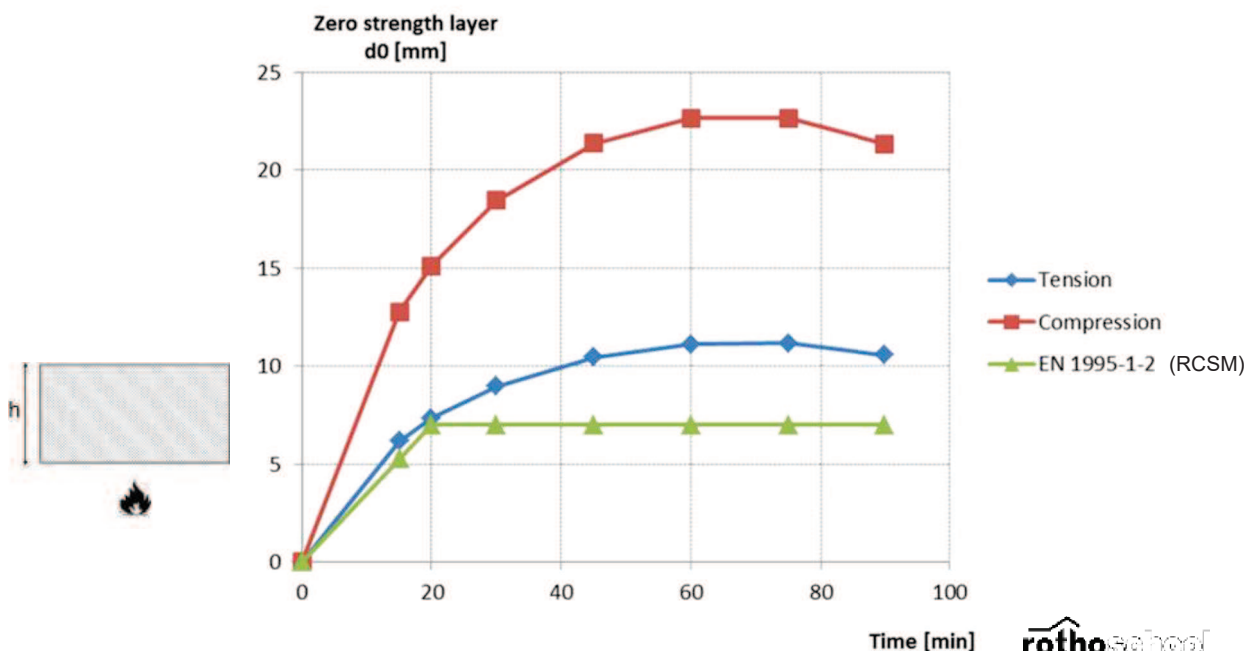
Brandbemessung nach EN 1995-1-2 bzw. SIA 265

- Bemessungsmethode mit reduziertem Querschnitt wurde für stabförmige Querschnitte entwickelt



Zero strength layer: Holzplatte h=100mm

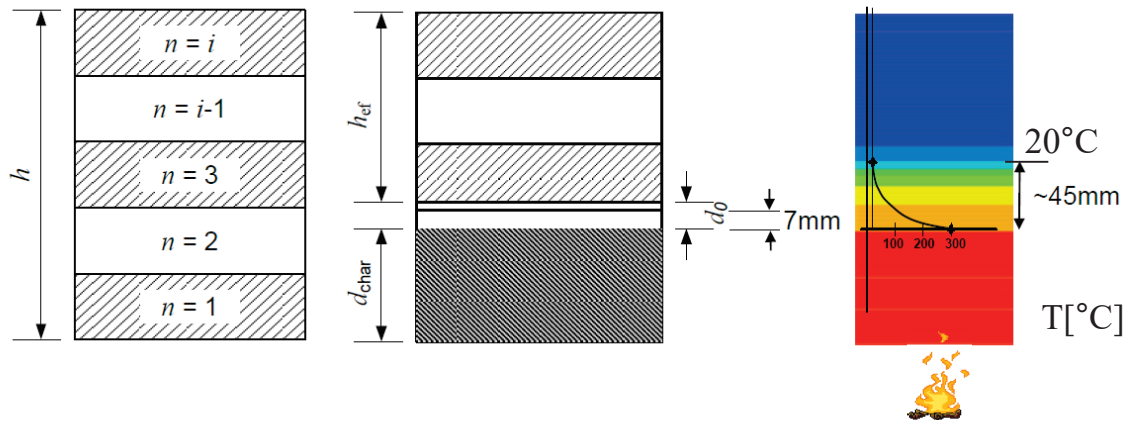
- Bemessungsmethode mit reduziertem Querschnitt (RCSM)
- Festigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur gemäss EN 1995-1-2 (König)
- $\beta = 0.7$ mm/Min.





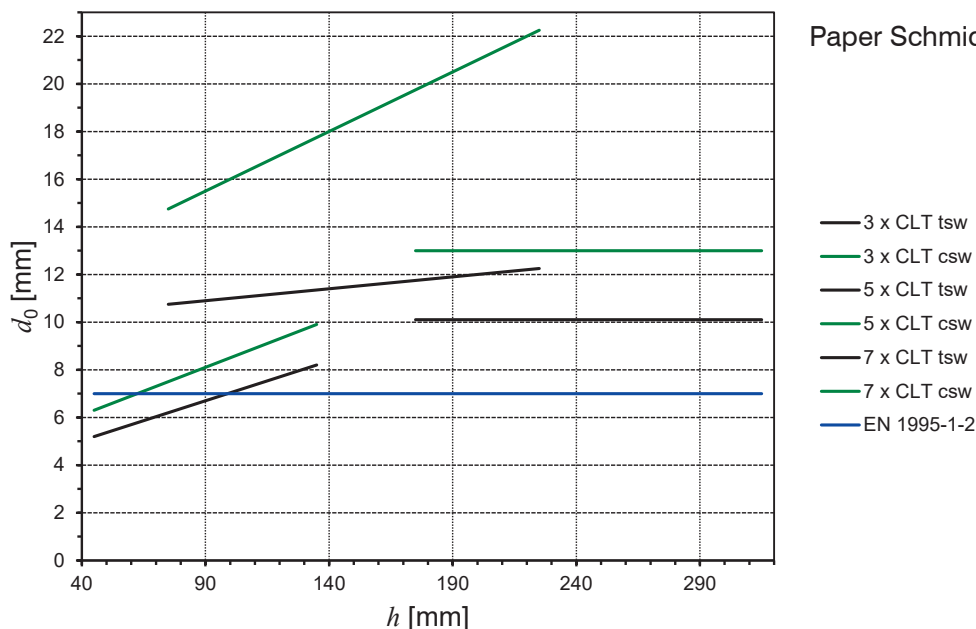
Zero strength layer: CLT

- Orientierung und Anzahl der Schichten von CLT haben einen Einfluss auf das Tragverhalten im Brandfall. Der Abbrand einer nichttragenden Schicht mit niedriger Steifigkeit und Festigkeit hat kaum eine Auswirkung auf den Feuerwiderstand.



Zero strength layer: CLT

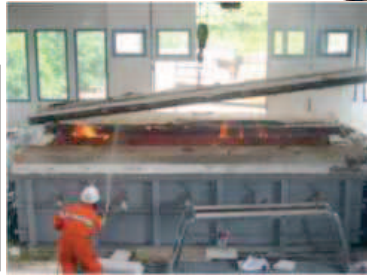
- d_0 : kein konstanter Wert
- d_0 hängt von der Beanspruchung
- d_0 hängt von dem CLT Aufbau
- d_0 hängt von der Branddauer



Paper Schmid et al (2012)

Untersuchte Parameter

Brandversuche Deckenelemente
- Belastung variiert
- Geschützt – ungeschützte Bauteile



Zusammenfassung und Vergleich mit EN 1995-1-2 - Methode

XLAM panel Load level	Unprotected		Protected	
	11%	21%	11%	21%
RCSM	118 min	103 min	127 min	112 min
RCSM for XLAM	111 min	96 min	122 min	107 min
Experimental	-	99 min	-	110 min

Table 5.8 - Analytical-experimental comparison of the fire resistance of unprotected and protected XLAM floor panels.

Sehr gute Übereinstimmung
der Versuche mit
Bemessungsmethode in
EN 1995-1-2

Abbildungen und Informationen dieser Folie entnommen aus:
A. Menis: "Fire resistance of Laminated Veneer Lumber (LVL) and Cross-Laminated Timber (XLAM) elements", PhD thesis, Italy, 2012.

Brettsperrholz

- Brandverhalten von CLT bekannt
 - Über 100 dokumentierte Brandversuche
- Bemessungsgrundlagen
 - Wände: $\beta_n = 0.8 \text{ mm/Min.}$
 - Decken: $\beta_0 = 0.65 \text{ mm/Min. bzw.}$
 $\beta_0 = 1.3 \text{ mm/Min.}$
- Massive Bauweise
 - Hohlraumfrei, Dichtigkeit (EI Kriterium)
 - Hoher Feuerwiderstand (R-Kriterium)
 - Robustheit
 - Vergrößerung Brandlast (Sprinkler, Kapselung)





Brandsicherheit von verklebten tragenden Holzbauteilen

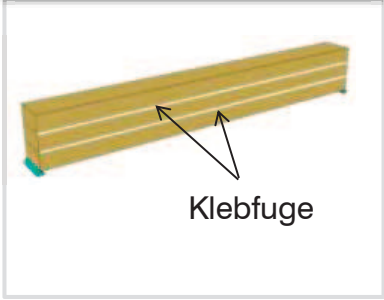


Brandsicherheit von verklebten tragenden Holzbauteilen

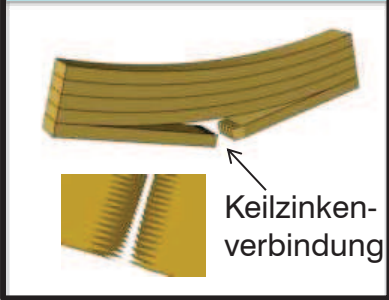
Verwendung von Klebstoffen in verklebten
tragenden Holzbauteilen

Verklebung Brettschichtholz (BSH)

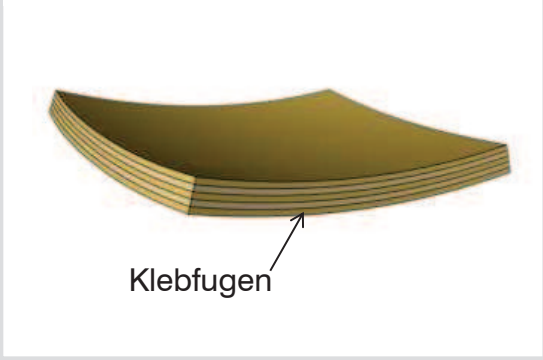
Flächige Verklebung



Keilzinken-Verbindung



Verklebung Brettsperrholz (BSP)

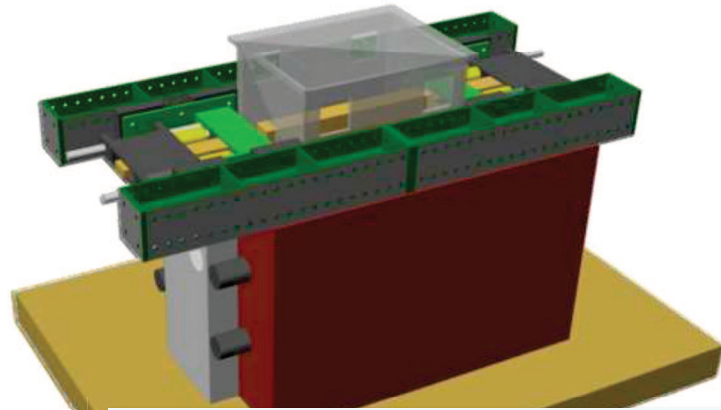
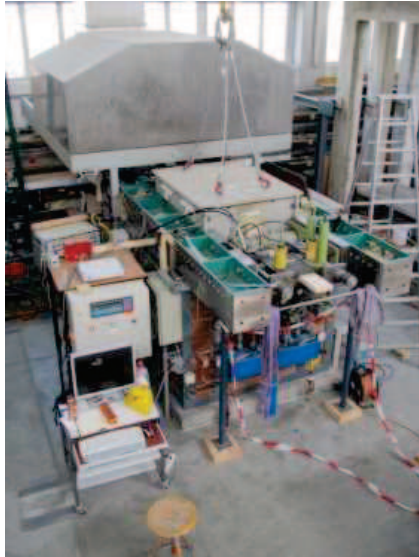


Klebstoff hat keinen
signifikanten Einfluss
auf Tragfähigkeit im
Brandfall



Brandsicherheit von verklebten tragenden Holzbauteilen

Brandversuche

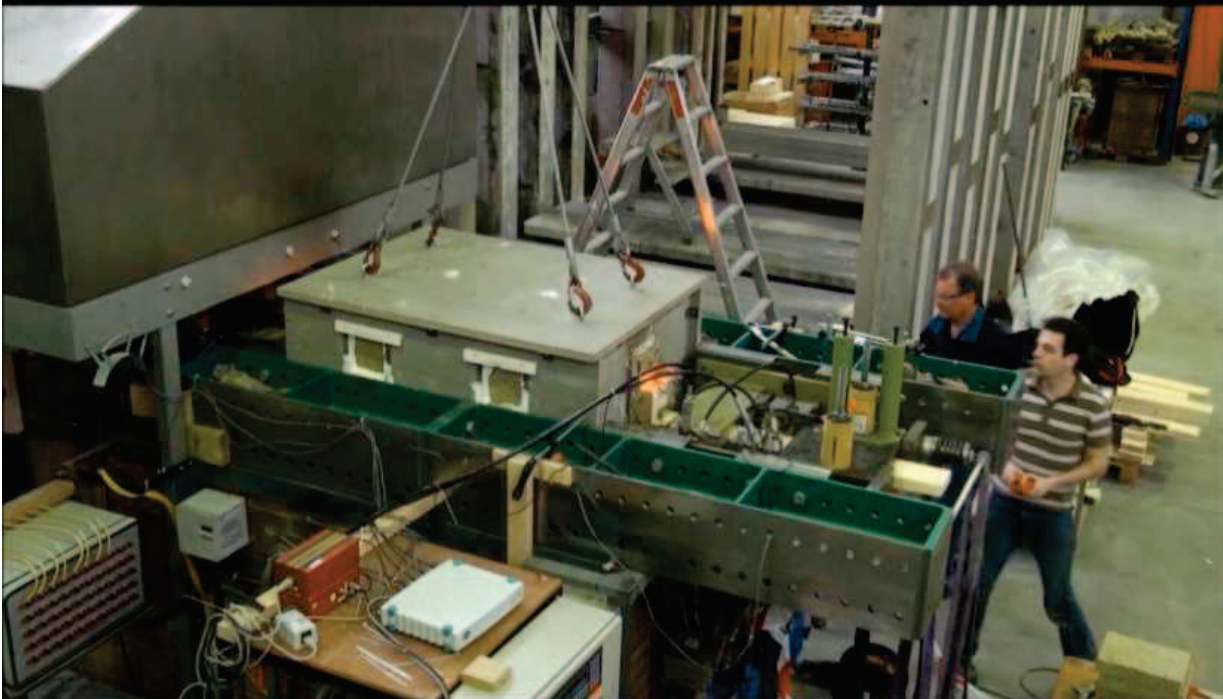


- ⇒ Reale Bauteilabmessungen
- ⇒ Unter Last
- ⇒ ISO-Normbrand

(Kleiner Horizontalofen der Empa in Dübendorf)

rothoblaas

After Failure: Disassembling of the specimen



rothoblaas



Versuchsprogramm Brandversuche

Versuchsparameter	Beschreibung																
Klebstoff	<table> <tr> <th>Anzahl</th><th>Untersuchte Klebstoffe</th></tr> <tr> <td>5</td><td>PUR-Klebstoffe</td></tr> <tr> <td>3</td><td>MUF</td></tr> <tr> <td>1</td><td>PRF</td></tr> <tr> <td>1</td><td>EPI</td></tr> <tr> <td>1</td><td>UF</td></tr> <tr> <td>1</td><td>PVAc</td></tr> <tr> <td>12</td><td>Verschiedene Klebstoffe</td></tr> </table>	Anzahl	Untersuchte Klebstoffe	5	PUR-Klebstoffe	3	MUF	1	PRF	1	EPI	1	UF	1	PVAc	12	Verschiedene Klebstoffe
Anzahl	Untersuchte Klebstoffe																
5	PUR-Klebstoffe																
3	MUF																
1	PRF																
1	EPI																
1	UF																
1	PVAc																
12	Verschiedene Klebstoffe																
Belastung																	
Prüfkörperbreite																	
Brandeinwirkung																	



:: 49 Brandversuche ::
Es wurden alle gängigen im strukturellen Holzleimbau verwendeten Klebstofftypen untersucht



Versuchsprogramm Brandversuche

Strukturelle Klebstoffe

PUR, MUF, PRF, EPI

- Werden im strukturellen (tragenden) Holzleimbau eingesetzt
- Sind nach aktuellen europäischen Normen zertifiziert (EN 301, EN 15425, EN 16254)

Nicht - Strukturelle Klebstoffe

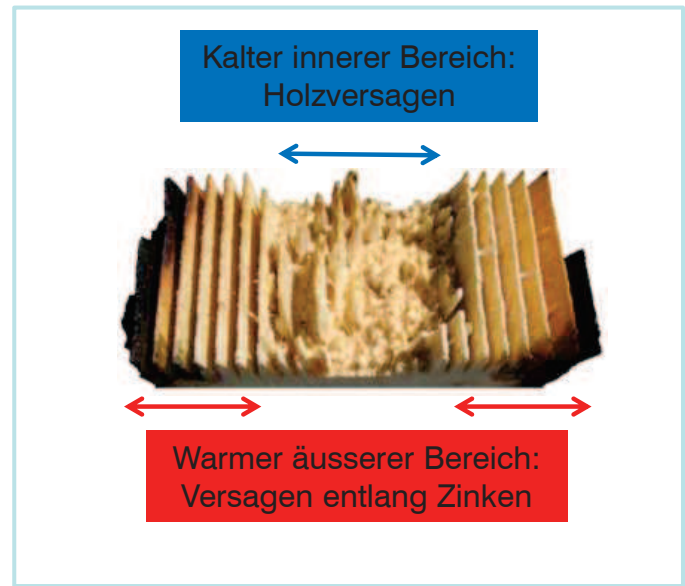
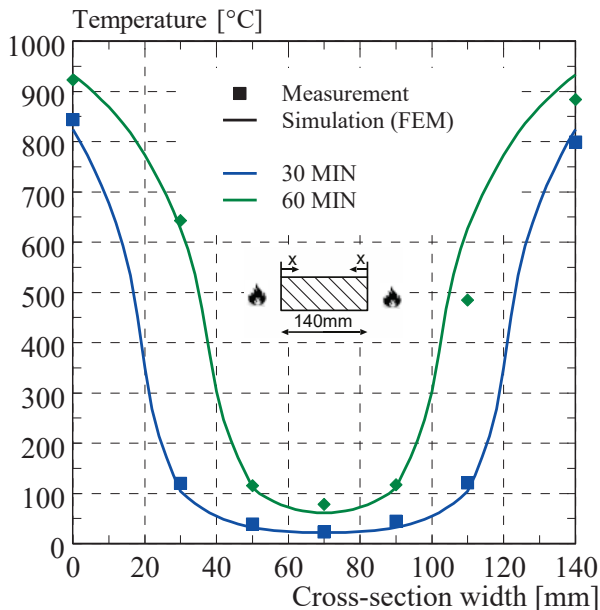
UF, MUF, PUR, PVAc

- Werden im nicht-tragenden Bereich eingesetzt
- Verwendung in der (z.B.) Möbelindustrie





Temperaturverlauf Holzquerschnitt im Brand



1. Gemessener Temperaturverlauf durch Simulationen reproduzierbar
2. Versagensbild ist durch Temperaturverteilung erklärbar



Vier zentrale Fragestellungen

1

Bei welchen Temperaturen sollten Klebstoffe geprüft werden, um den Brandfall abzudecken?



Klebstoffe benötigen für den Einsatz im Brettschichtholz im Temperaturbereich bis 140°C eine ausreichende Festigkeit.

2

Welche Prüfmethode soll verwendet werden?

3

Beeinflusst der Klebstoff das Tragverhalten von Brettschichtholz im Brandfall?

4

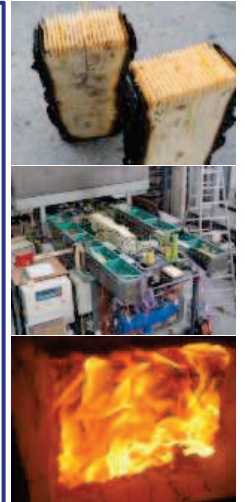
Sollte der Klebstoff bei der Bemessung von Holzbauteilen berücksichtigt werden?



Versuchsergebnisse

1 Es liessen sich **keine signifikanten Unterschiede zwischen den geprüften strukturellen Klebstoffen** feststellen.

2 Keilzinken mit **strukturellen Klebstoffen**, die nach aktuellen europäischen Normen zertifiziert sind, erreichten eine **ausreichende Festigkeit im Brandfall**.



Vier zentrale Fragestellungen

1 Bei welchen Temperaturen sollten Klebstoffe geprüft werden, um den Brandfall abzudecken?



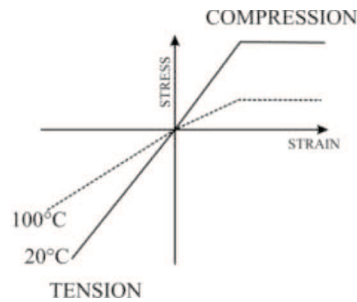
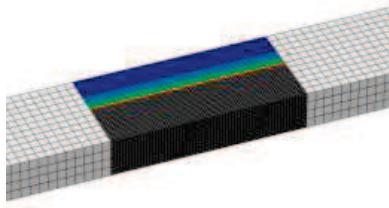
2 Welche Prüfmethode soll verwendet werden?



Klebstoffe, die nach aktuellen europäischen Normen zertifiziert sind, erreichen ausreichende Festigkeiten im Brandfall für den Einsatz im Brettschichtholz.

3 Beeinflusst der Klebstoff das Tragverhalten von Brettschichtholz im Brandfall?

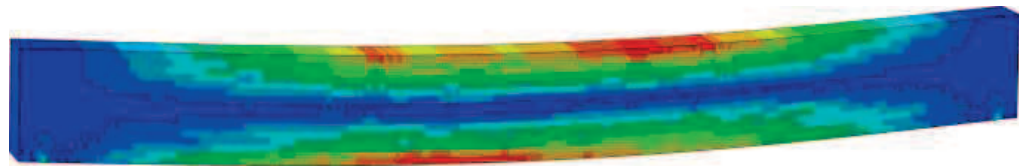
4 Sollte der Klebstoff bei der Bemessung von Holzbauteilen berücksichtigt werden?



3

Numerische
Untersuchungen

Numerische Untersuchungen an Brettschichtholz im Brandfall unter Berücksichtigung des Klebstoffverhaltens



Vier zentrale Fragestellungen

1

Bei welchen Temperaturen sollten Klebstoffe geprüft werden, um den Brandfall abzudecken?



2

Welche Prüfmethode soll verwendet werden?



3

Beeinflusst der Klebstoff das Tragverhalten von Brettschichtholz im Brandfall?



Kein signifikanter Einfluss von strukturellen Klebstoffen auf den Feuerwiderstand von BSH.

4

Sollte der Klebstoff bei der Bemessung von Holzbauteilen berücksichtigt werden?



Bemessung im Brandfall nach EN 1995-1-2

Berücksichtigung der Versagensart im Brandfall

Versuch 1, Klebstoff a

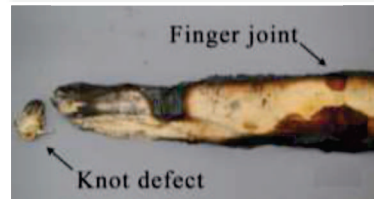
Klebstoffeinfluss



Feuerwiderstand:
53 Minuten

Versuch 2, Klebstoff a

Holzeinfluss



Feuerwiderstand:
42 Minuten

Ein frühzeitiges Versagen ist möglich, und dies unabhängig des Klebstoffes in der Keilzinkung!



Vier zentrale Fragestellungen

1

Bei welchen Temperaturen sollten Klebstoffe geprüft werden, um den Brandfall abzudecken?



2

Welche Prüfmethode soll verwendet werden?



3

Beeinflusst der Klebstoff das Tragverhalten von Brettschichtholz im Brandfall?

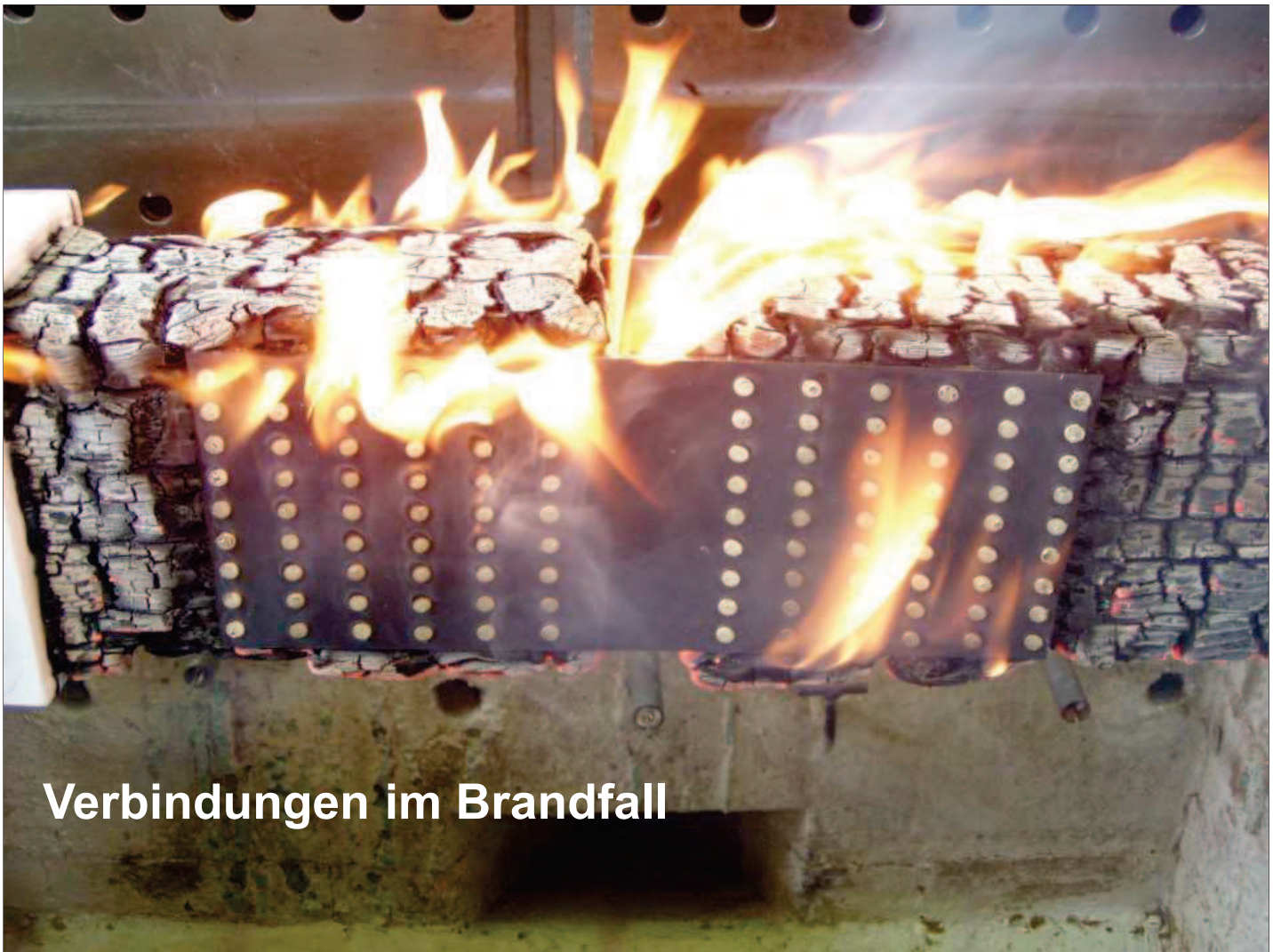


4

Sollte der Klebstoff bei der Bemessung von Brettschichtholz berücksichtigt werden?

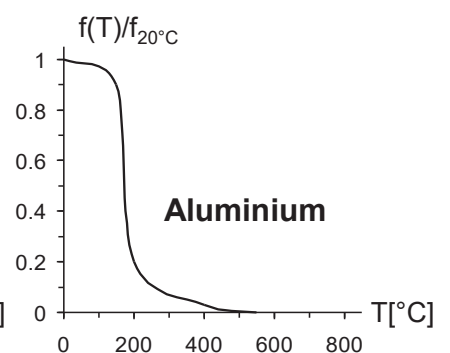
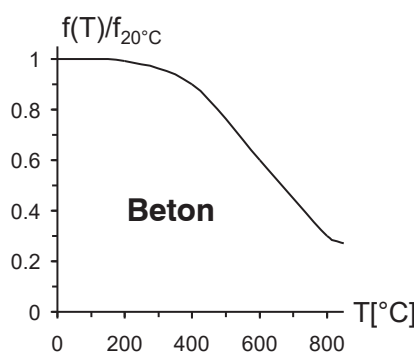
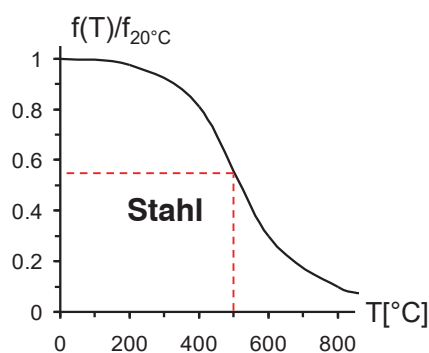


Bemessung weiterhin unabhängig des strukturellen Klebstoffes durchführen.



rothoblaas

Materialvergleich im Brandfall



Bei hohen Temperaturen: Verlust an Festigkeit und Steifigkeit



Rest-
querschnitt

Holz:
Zusätzlich Verlust an Querschnitts-
fläche, Eckausrundungen

Quelle: proHolz, Österreich

rothoblaas

Grundsätzliche Überlegungen

➔ Verbindungen mit Stahlteilen:

- Aussen liegende Stahlteile vermeiden bzw. verkleiden
- Grössere Rand- und Endabstände; Mindestholzdicken
- Schlitz für Bleche schmal, so dass durch Bleche satt ausgefüllt
- Bleche / Verbindungsmittel versenken
- Schraubenköpfe vor Temperatur schützen

➔ Günstige Massnahmen für Verbindungen im Brandfall:

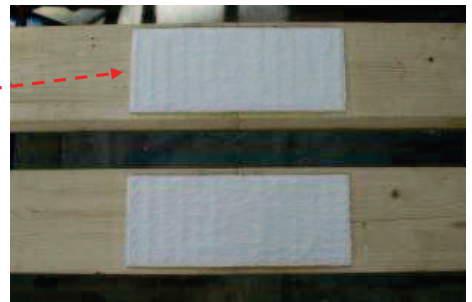
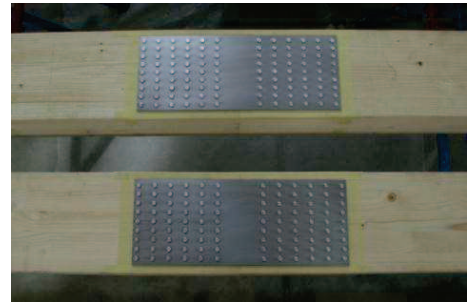
- Vergrösserung der Rand- und Endabstände
- Verkleiden
- (Überdimensionieren)



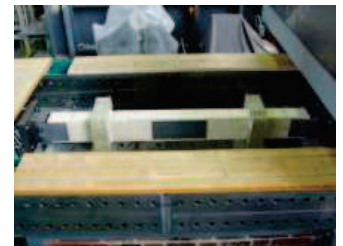
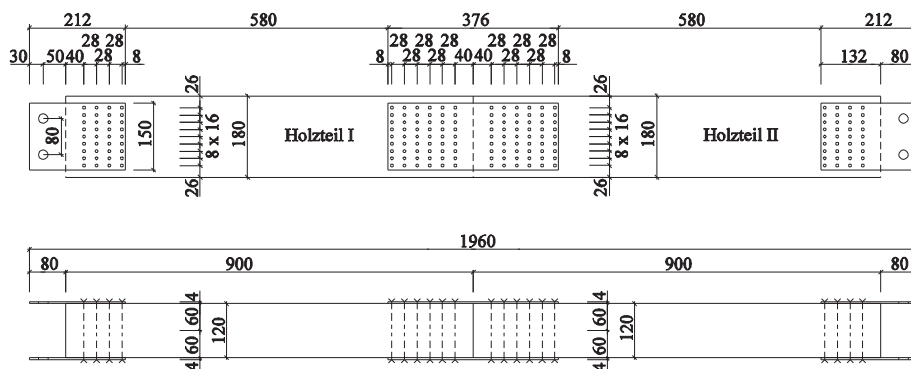
Brandverhalten von Rillennagelverbindungen mit aussen liegenden Blechen

Brandverhalten von Rillennagelverbindungen mit aussen liegenden Blechen

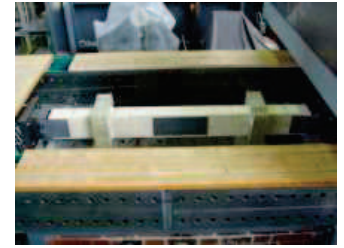
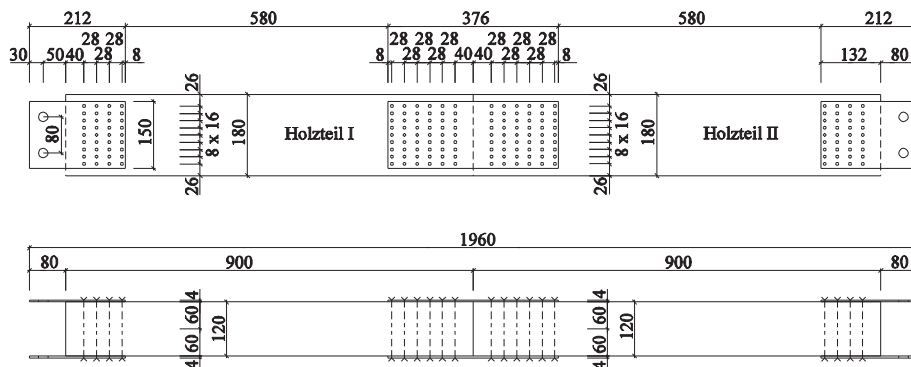
- Versuchsprogramm
 - 5 Versuche bei Raumtemperatur nach EN 26891
 - 8 Versuche unter ISO - Normbrandbeanspruchung
- Testparameter der Brandversuche
 - Belastungsgrad (30 und 15 % von F_{Kalt})
 - 4 Versuche mit Brandschutzanstrich *SIKA Pyroplast Steel D*



▪ Versuchskörper

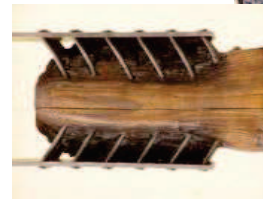


■ Versuchskörper

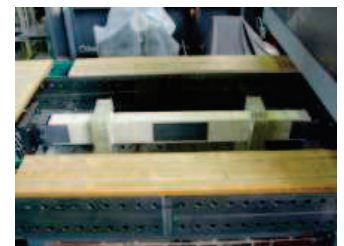
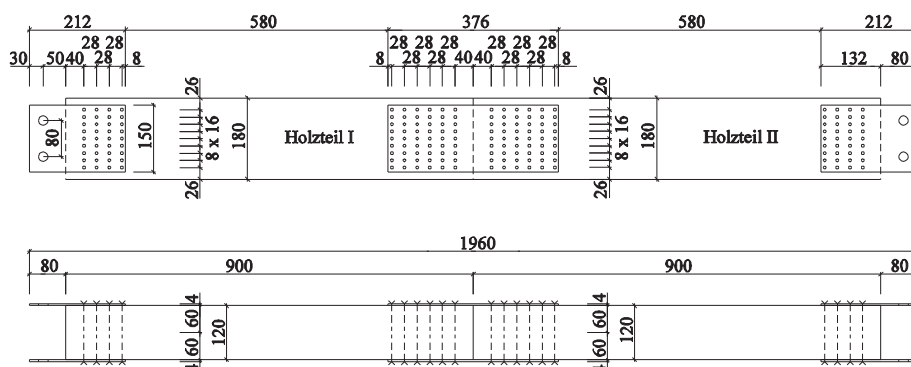


■ Versuchsergebnisse

- ungeschützt: Feuerwiderstand 13 Minuten (Mittelwert)
- geschützt: Feuerwiderstand 32 Minuten (Mittelwert); **R30**
- erhöhter Abbrand unter den Stahlblechen
- starke Verformungen der Rillennägel



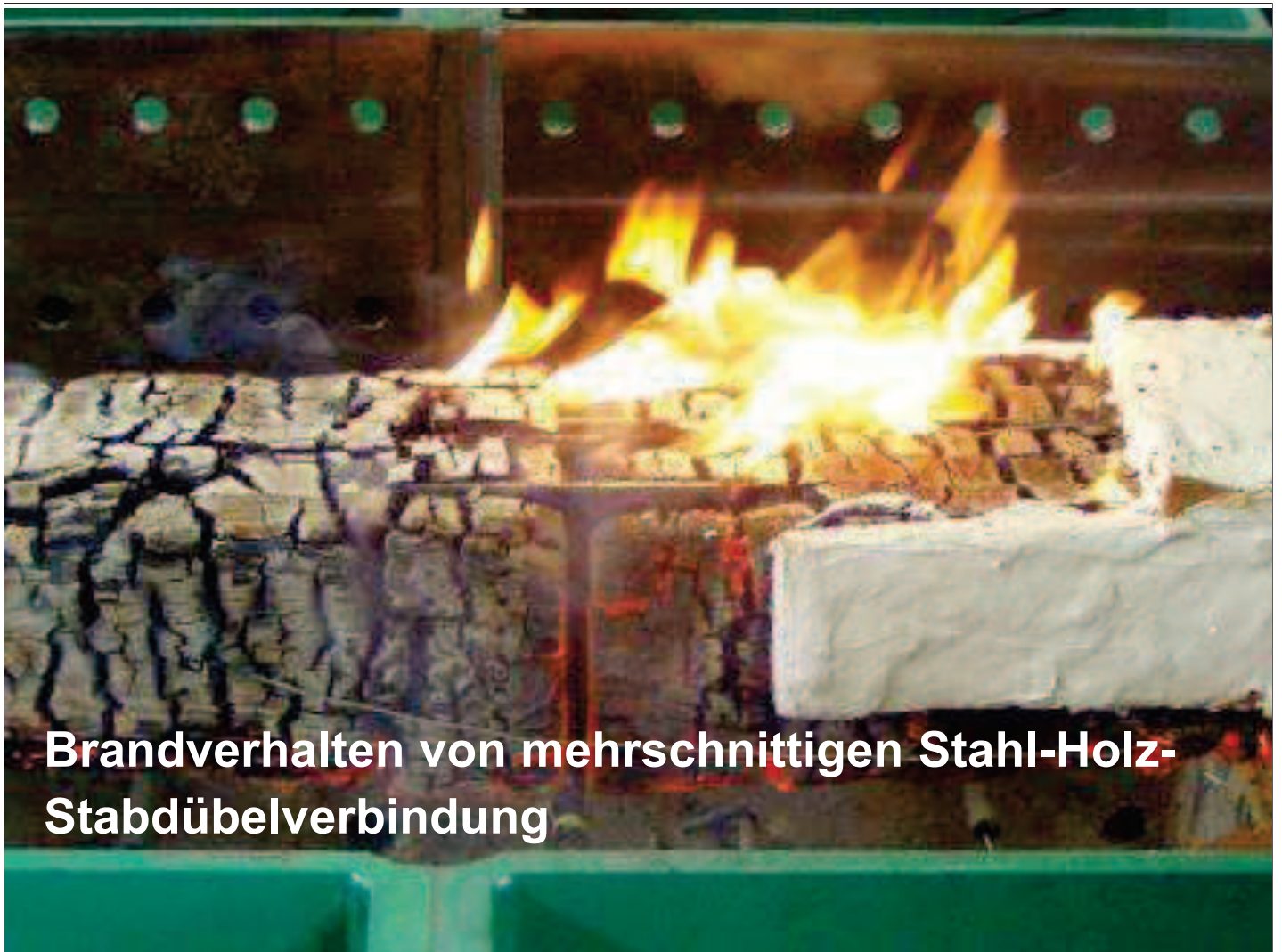
■ Versuchskörper



■ Versuchsergebnisse

- ungeschützt: Feuerwiderstand 13 Minuten (Mittelwert)
- geschützt: Feuerwiderstand 32 Minuten (Mittelwert); **R30**
- erhöhter Abbrand unter den Stahlblechen
- starke Verformungen der Rillennägel
- Aufschäumen des Anstriches ungleichmässig





Brandverhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindung

 rothoblaas



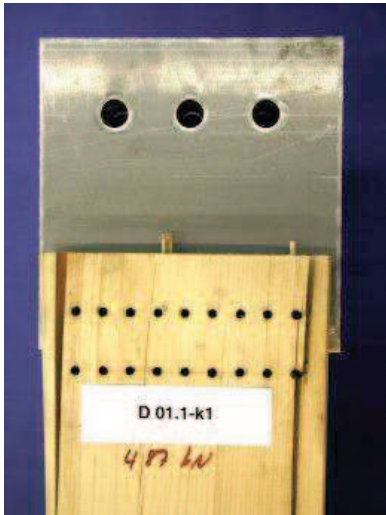
Brandverhalten von mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindung



 rothoschool

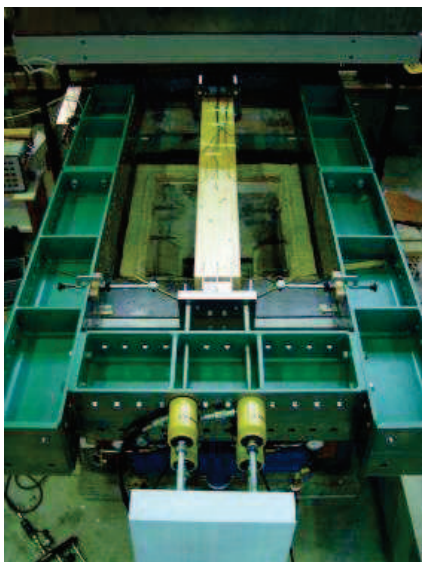
Kaltversuche

30 Kaltversuche an mehrschnittigen Stahl-Holz-Stabdübelverbindung



Brandversuche R30 und R60

26 Brandversuche



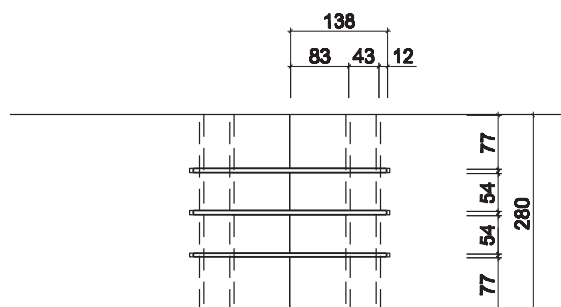
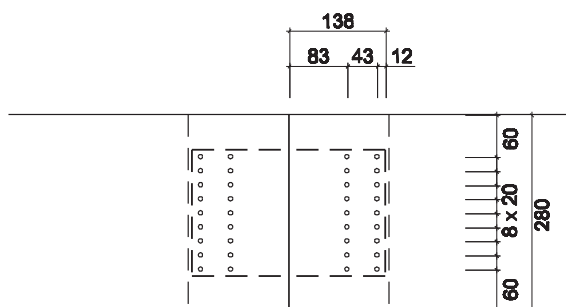
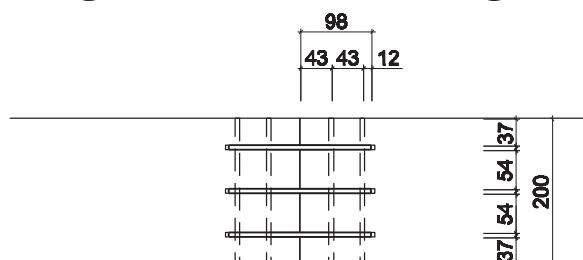
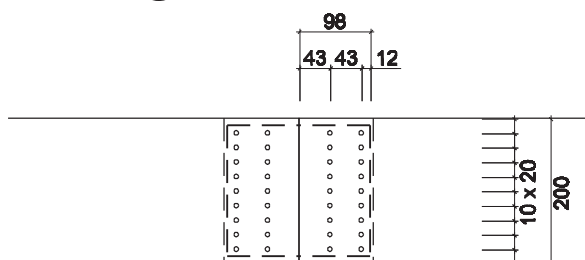
■ Versuchsparameter

- Last während des Brandversuches ($0.3 \cdot F_u$, $0.15 \cdot F_u$ and $0.075 \cdot F_u$)
- Anzahl von Stabdübeln, Geometrie (9x2, 9x3, 3x3 und 4x2 Stabdübel)
- Durchmesser Stabdübel (6.3 mm and 12 mm)
- Vergrößerte Holzüberdeckungen Abmessungen
- Verkleidung der Verbindung



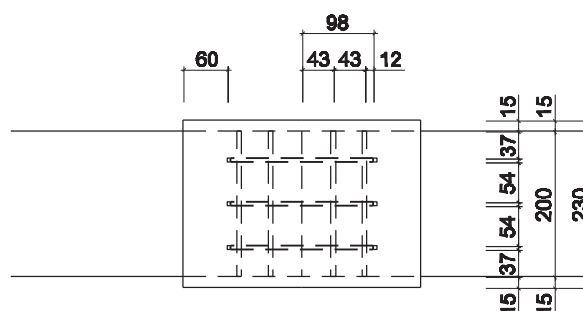
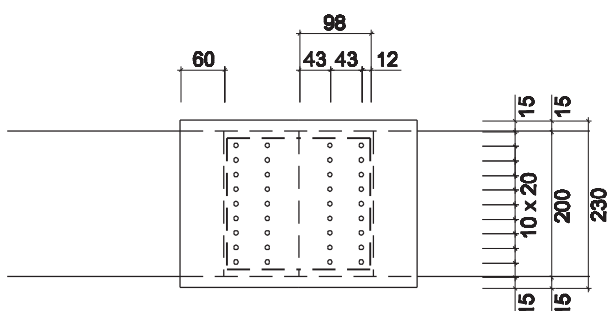
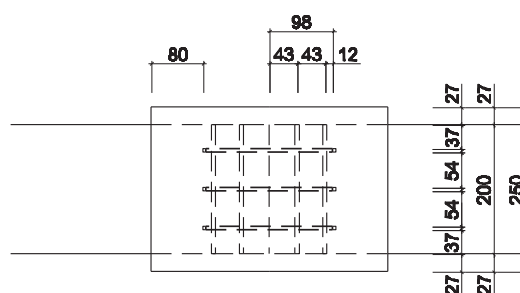
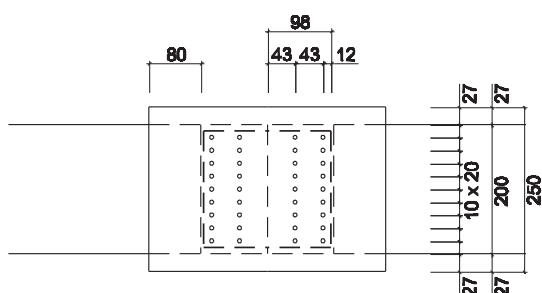
Stahlblech-Holz-Verbindungen R60

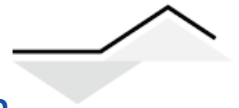
Vergrösserte Holzüberdeckungen / Abmessungen



Stahlblech-Holz-Verbindungen R60

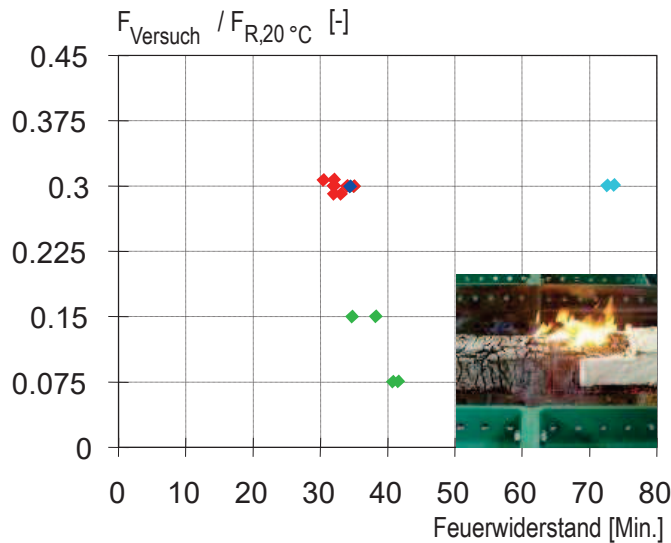
Abdecken mit Holz- oder Gipsplatten



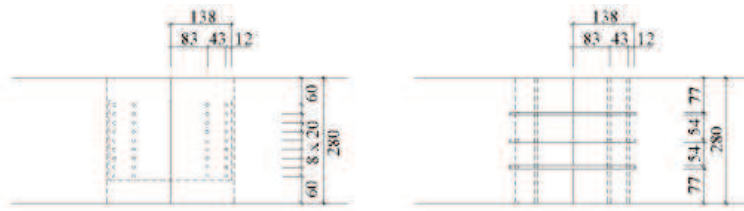


Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

Versuchsergebnisse

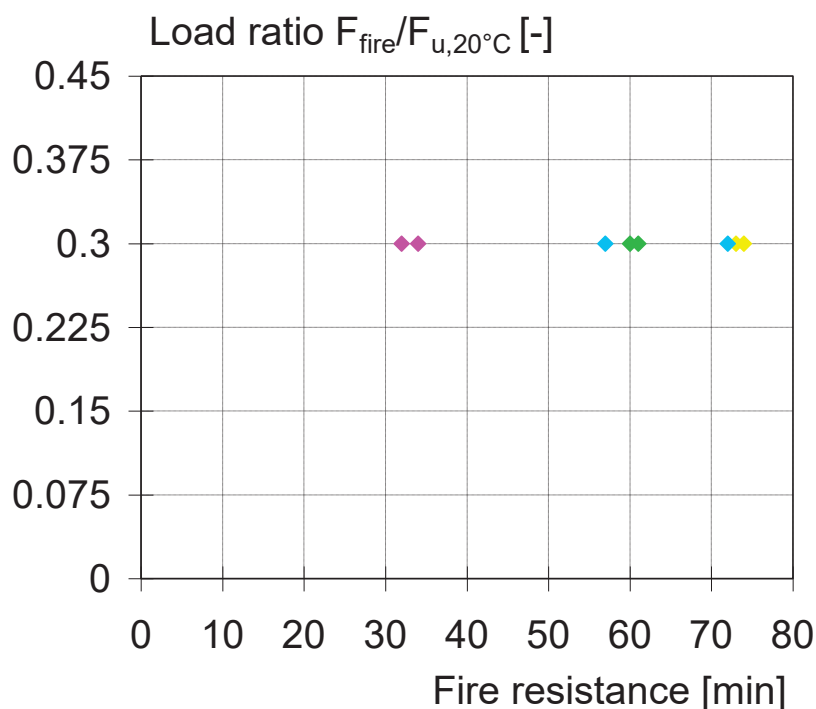


- ◆ 2x9 Stabdübel, d=6.3mm
3x9 Stabdübel, d=6.3mm
3x3 Stabdübel, d=6.3mm
- ◆ 2x4 Stabdübel, d=12mm
- ◆ 2x9 Stabdübel, d=6.3mm
Rand- und Endabstände um
40mm vergrößert
- ◆ 2x9 Stabdübel, d=6.3mm
Einfluss der Belastungsgrösse



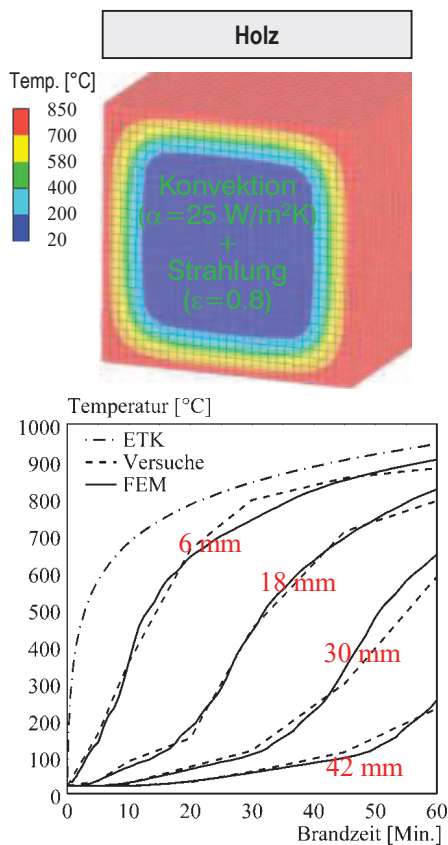
Mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindungen

Versuchsergebnisse

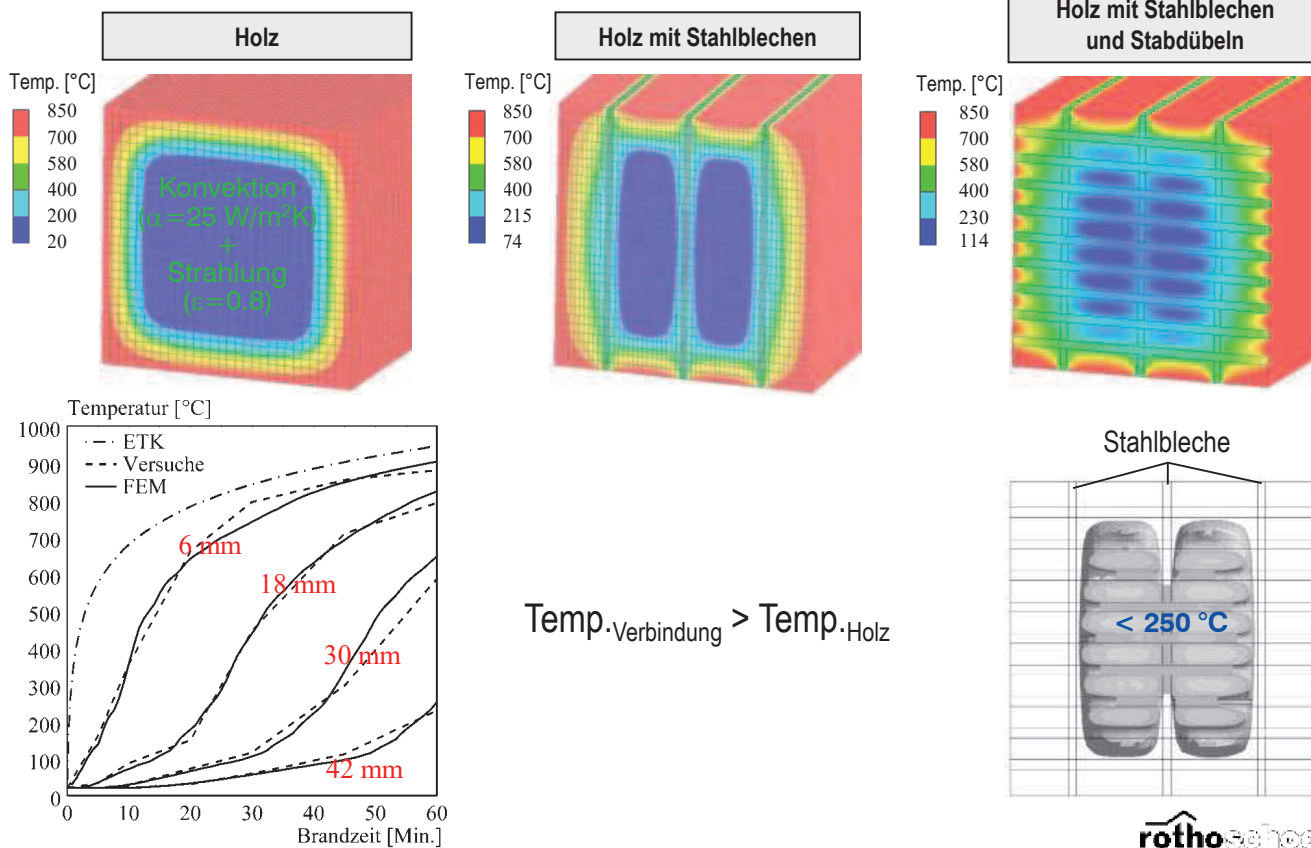


- ◆ D 01.1, 9x2 dowels,
d=6.3mm
- ◆ D 01.2, increased
timber covers
- ◆ D 01.3, protection by
timber boards
- ◆ D 01.4, protection by
gypsum plasterboards

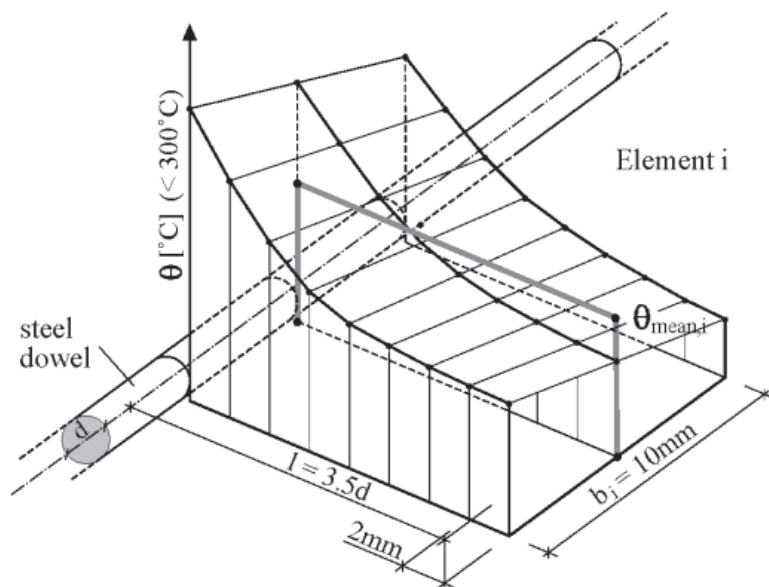
■ Numerische Simulationen (FE-thermische Analyse)



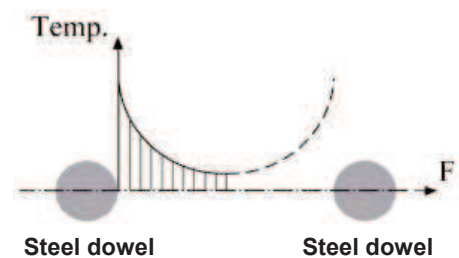
■ Numerische Simulationen (FE-thermische Analyse)



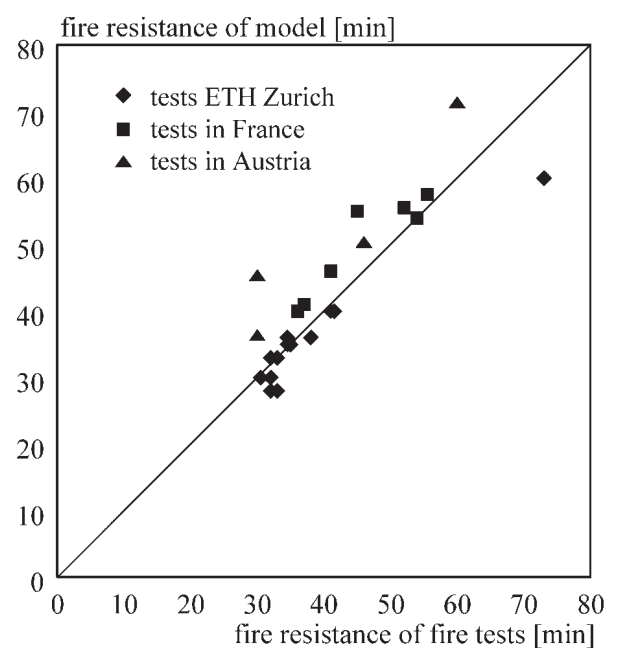
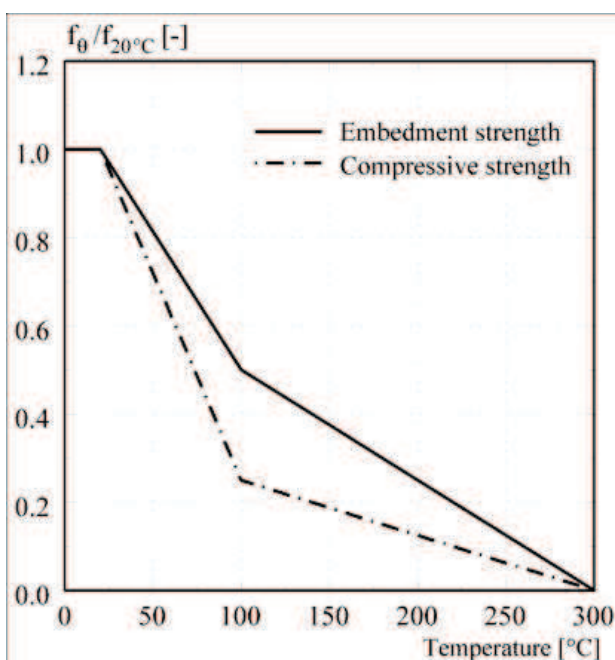
Tragmodell



$$R_{fi} = n_{tot} \cdot \sum_{i=1}^n (f_{h,i}(\theta_{mean,i}) \cdot b_i) \cdot d$$



Tragmodell

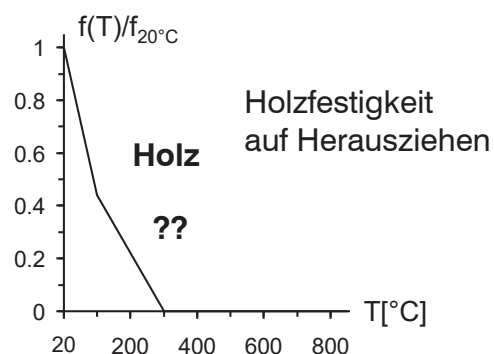
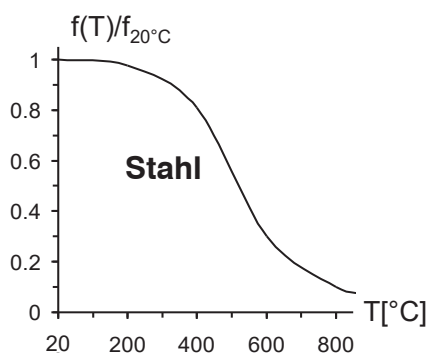


Brandverhalten von Zugverbindungen: Schrauben

- Zugverbindungen: Beanspruchung parallel zur Schaftrichtung
- Versagenarten für Schraubenverbindungen
 - Auszieh Widerstand des Gewindeteils der Schraube
 - Abreisswiderstand des Schraubenkopfs
 - Durchzieh Widerstand des Schraubenkopfs
 - Zugfestigkeit der Schraube
 - Ausscheren eines Holzteils

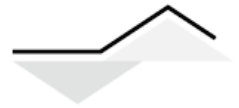
rothoblaas

Zugverbindungen

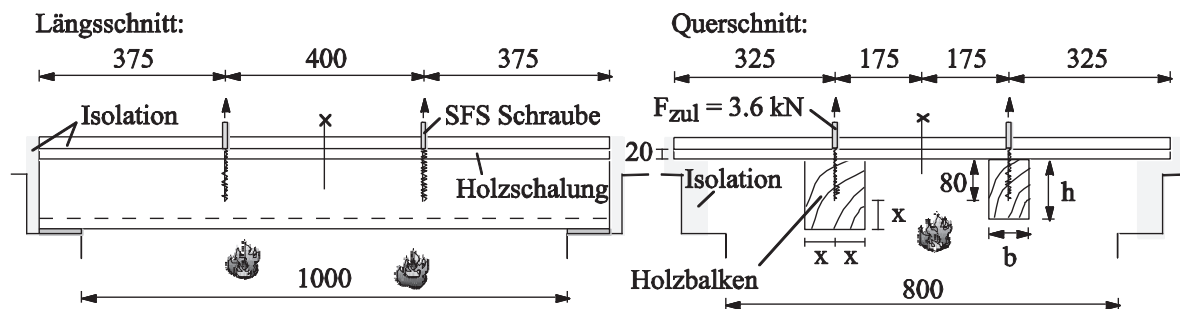


➡ Grundsätzliche Überlegungen:

- Temperaturbedingte Abnahme der Holzfestigkeit auf Herausziehen >> als temperaturbedingte Abnahme der Zugfestigkeit der Verbindungsmittel
- Im Brandfall Holzfestigkeit auf Herausziehen in der Regel massgebend



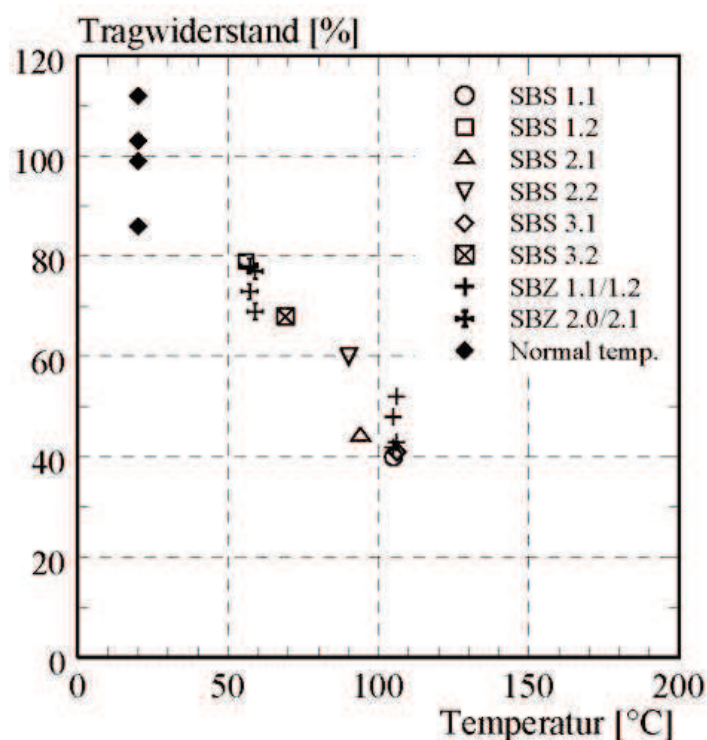
Ausziehversuche unter ISO-Brandeinwirkung



Erkenntnisse:

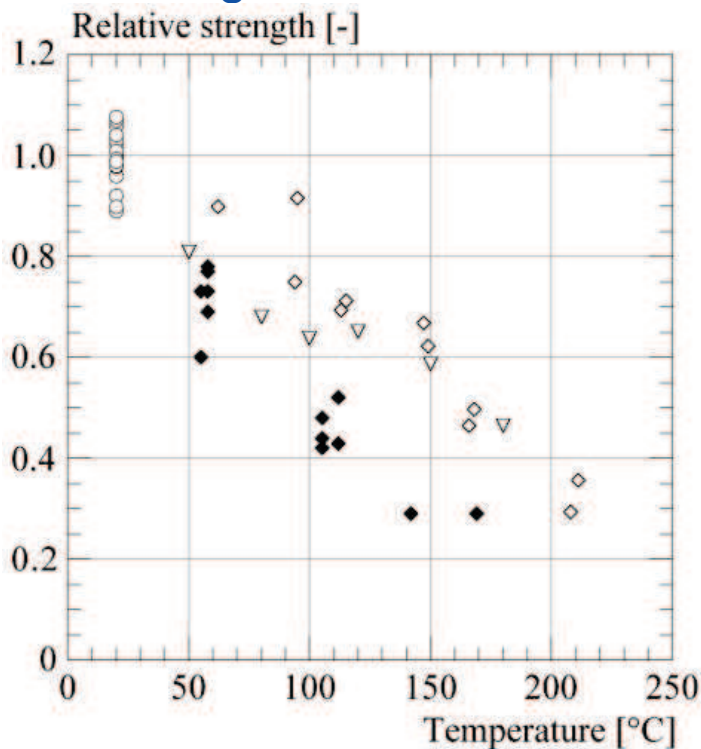
- Herausziehen der Schrauben massgebend
- Tragwiderstand abhängig von der Holztemperatur im Schraubenbereich
- Seitliche Holzüberdeckung der Schrauben massgebend
- Nahezu gleiche Resultate aus Auszieh- und Push-out Versuchen

Temperaturbedingte Abnahme des Tragwiderstandes der Verbindung auf Herausziehen

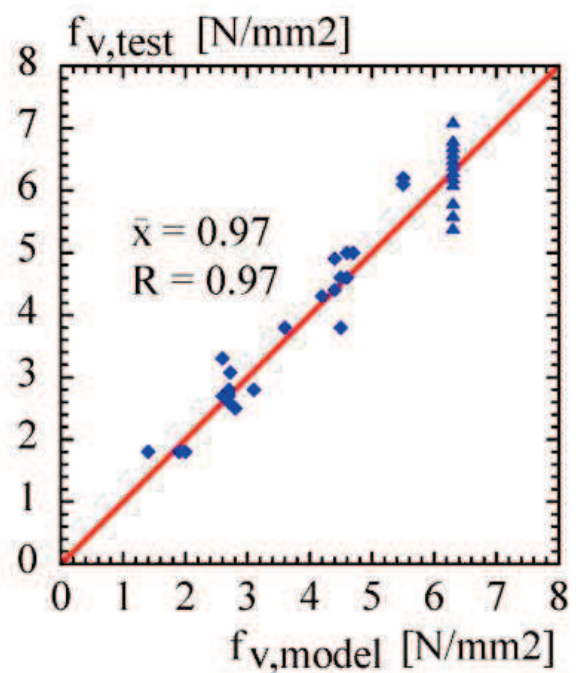
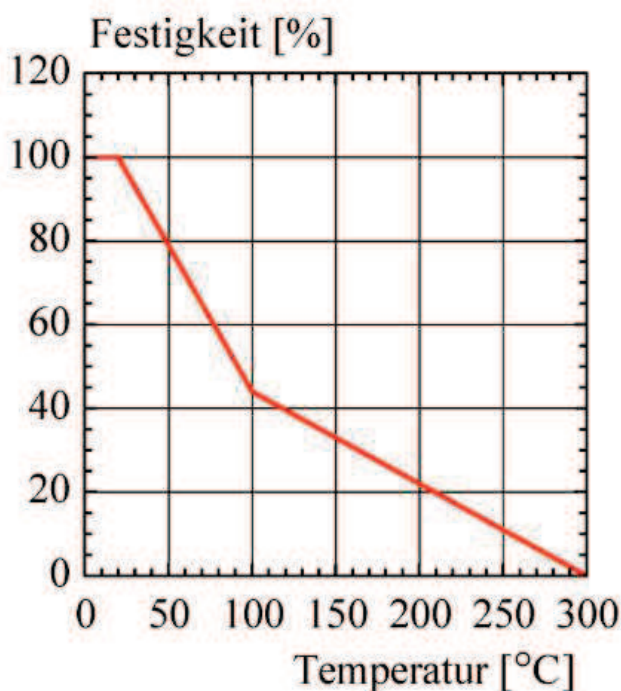




Temperaturbedingte Abnahme des Tragwiderstandes der Verbindung auf Herausziehen: Einfluss der Versuchsart

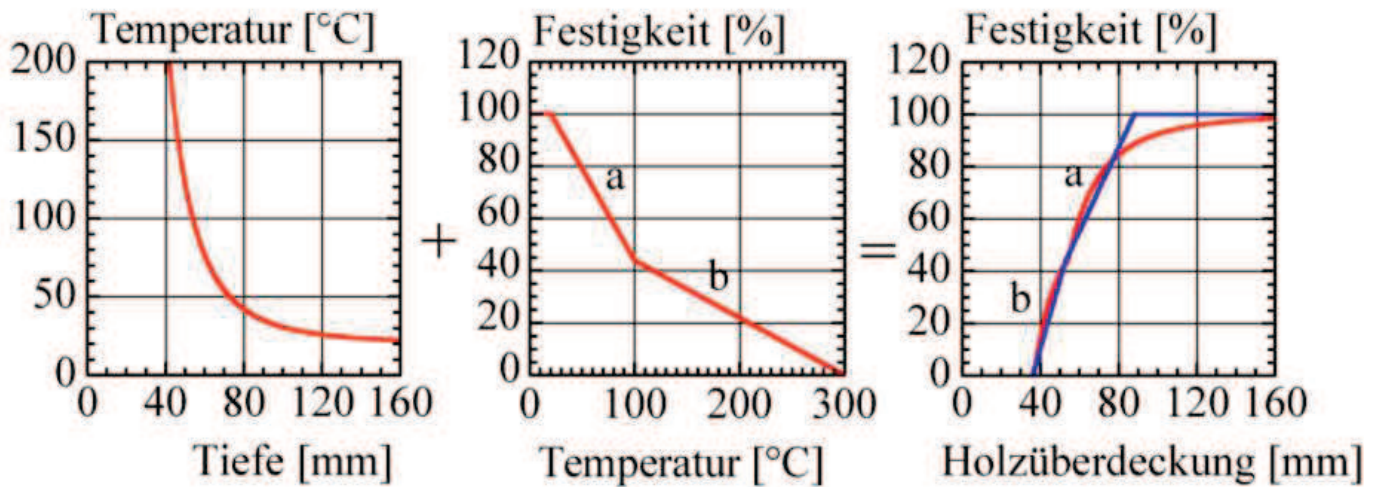


Temperaturbedingte Abnahme der Holzfestigkeit auf Herausziehen

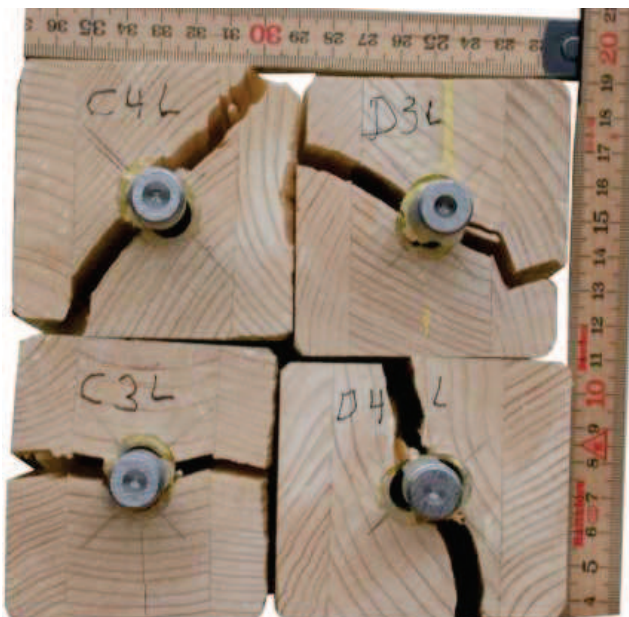




Temperaturbedingte Abnahme des Tragwiderstandes der Verbindung auf Herausziehen

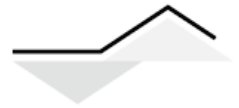


Brandverhalten Zugverbindungen: eingeklebte profilierte Stahlstäbe

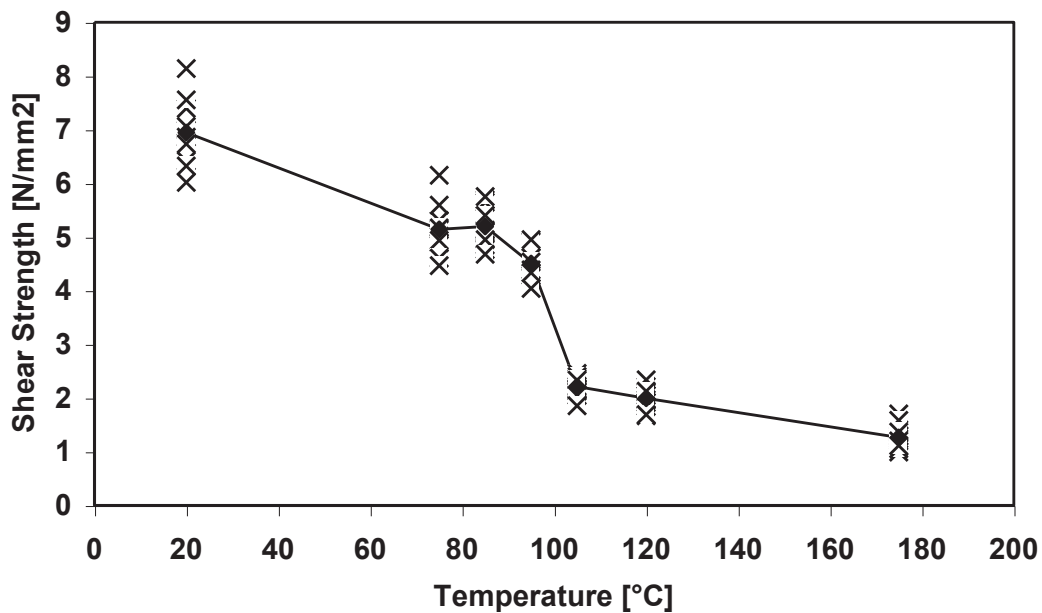


Versagenarten

- **Stahlversagen:** Versagen des profilierten Stabs (Zugversagen)
- **Klebstoffversagen**
 - Versagen des Klebstoffs und seines Verbunds mit dem profilierten Stab
 - Versagen des Klebstoffs und seines Verbunds mit dem Holz
- **Holzversagen**
 - Versagen des Holzes entlang der Klebfuge (Scherversagen)
 - Versagen eines Holzteils im Bereich der Verbindung



Temperaturbedingte Abnahme des Tragwiderstandes der Verbindung auf Herausziehen



$$f_v = \frac{F_u}{d_h \cdot \pi \cdot \ell_a}$$

Versuchstemp-
peratur

20°C

75°C

85°C

95°C

105°C

120°C

175°C



Versagenarten bei hohen Temperaturen



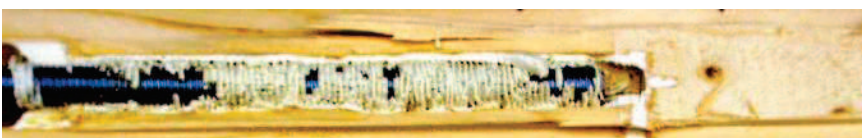
75°C

Versagen des Holzes entlang
der Klebfuge
(Scherversagen)



85-95°C

Klebstoffversagen: Versagen
des Klebstoffs und seines
Verbunds mit dem Holz

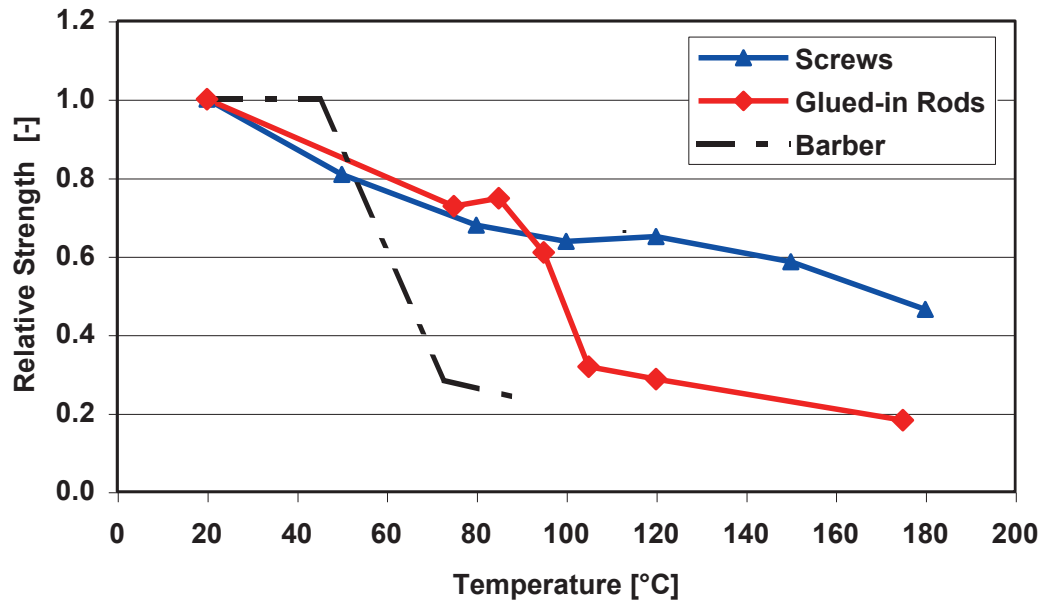


105-175°C

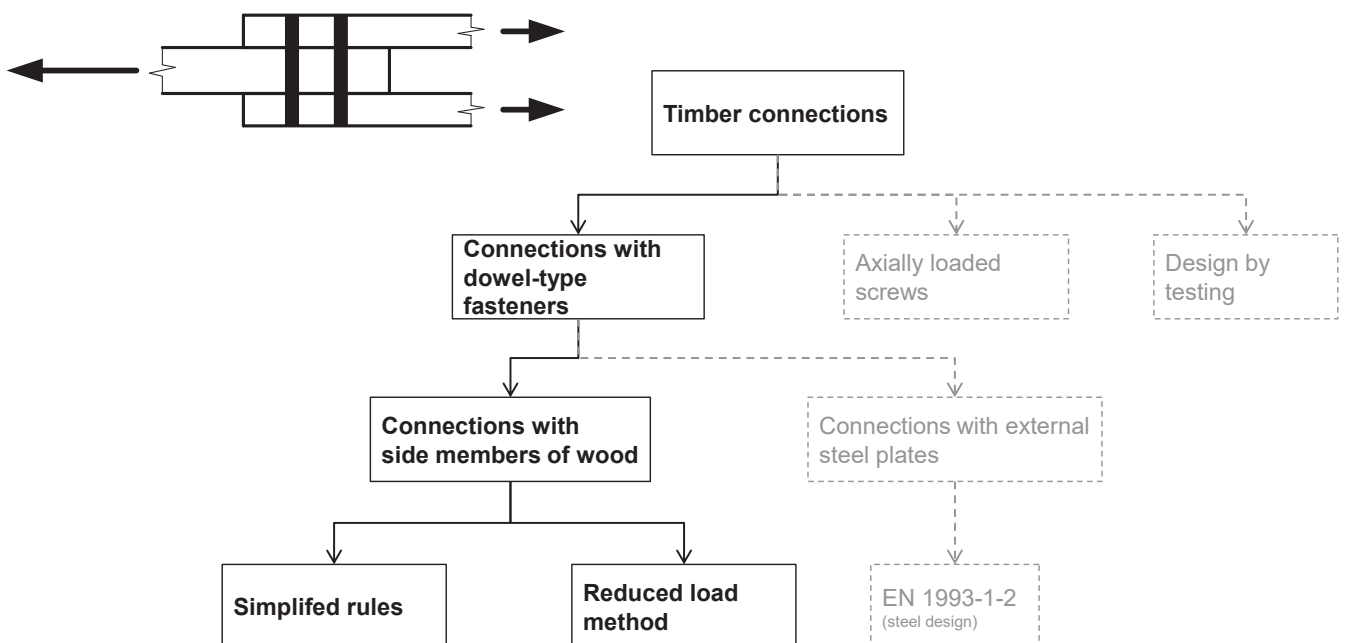
Klebstoffversagen: Versagen
des Klebstoffs und seines
Verbunds mit dem profil. Stab



Temperaturbedingte Abnahme des Tragwiderstandes der Verbindung auf Herausziehen: Einfluss Verbindungsart



Bemessungsmethoden gemäss EN 1995-1-2





Simplified rules – unprotected connections

- Connections designed according to EN 1995-1-1

Fastener / connector type	Fire resistance $t_{d,fi}$ [min.]	Provisions
Nails	15	$d \geq 2,8$ mm
Screws	15	$d \geq 3,5$ mm
Bolts	15	$t_1 \geq 45$ mm
Dowels	20	$t_1 \geq 45$ mm
Connectors (EN 912)	15	$t_1 \geq 45$ mm

d is the diameter of the fastener

t_1 is the thickness of the side member



Simplified rules – unprotected connections

- Greater fire resistance (not exceeding 30 min.) by increasing:

- thickness of side members
- width of the side members
- end / edge distance to fasteners

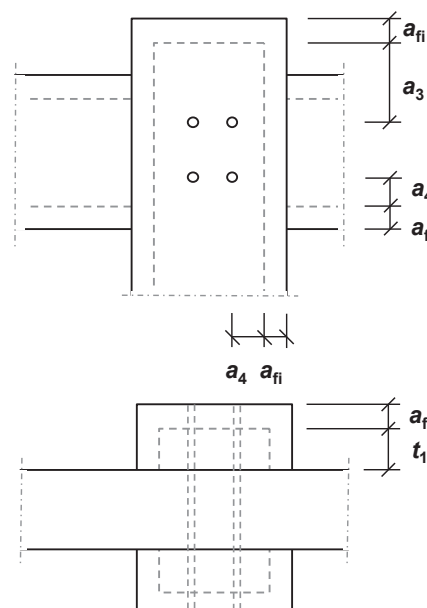
$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - t_{d,fi})$$

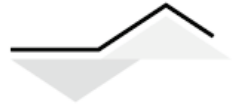
β_n is the notional charring rate

k_{flux} is a coefficient taking into account increased heat flux through the fastener

t_{req} is the required fire resistance

$t_{d,fi}$ is the fire resistance of the unprotected connection (previous table)

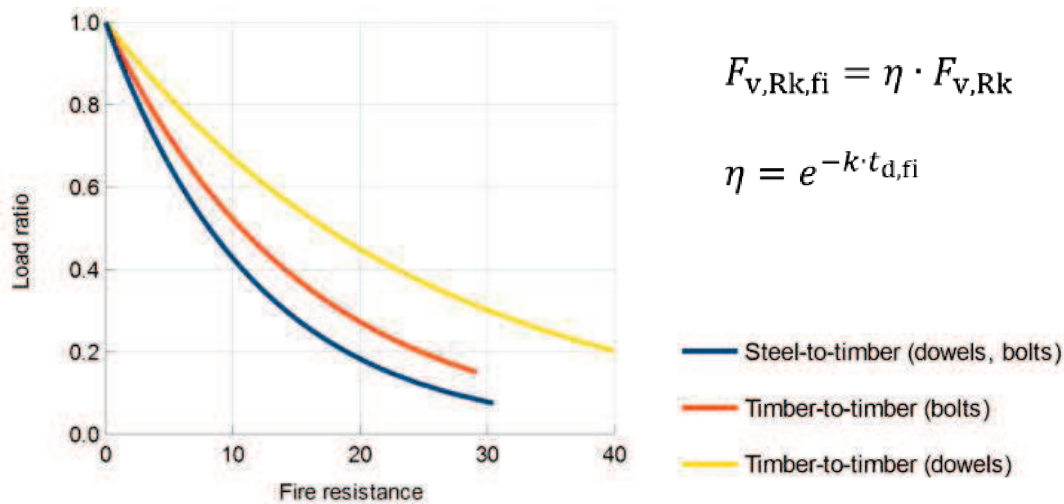




Connections: Reduced load method

▪ 'Load-carrying capacity' vs Fire resistance

- assumed as one-parameter exponential empirical model
- model parameter k for each connection type and limited to a maximum fire exposure period



Connections: Reduced load method

▪ Load-carrying capacity after a given fire exposure

$$F_{v,Rk,fi} = e^{-k \cdot t_{d,fi}} \cdot F_{v,Rk}$$



$$F_{v,Rd,fi} = e^{-k \cdot t_{d,fi}} \cdot F_{v,Rk} \cdot \frac{k_{fi}}{\gamma_{M,fi}}$$

Connection type	k	Maximum period of validity for k
Nails and screws	0.08	20 min.
Bolts wood-to-wood ($d \geq 12$)	0.065	30 min.
Bolts wood-to-wood ($d \geq 12$)	0.085	30 min.
Dowels wood-to-wood ^a ($d \geq 12$)	0.04	40 min.
Dowels steel-to-wood ^a ($d \geq 12$)	0.085	30 min.
Connectors (EN 912)	0.065	30 min.

^a requires one bolt for every four dowels

$F_{v,Rk}$ is the characteristic load-carrying capacity at normal temperature

$t_{d,fi}$ is the design fire resistance (in minutes)

k_{fi} is a factor to convert 5-percentile values to 20-percentile

$\gamma_{M,fi}$ is the partial safety factor for timber in fire

Berechnungsverfahren für brandabschnittsbildende Bauteile



Bauliche Brandschutzmassnahmen

Zielsetzung: Begrenzung der Brandausbreitung durch Einhaltung der

- Tragfähigkeit (**Anforderung an Tragfähigkeit R**) und
- brandabschnittsbildender Funktion (**Anforderung an Wärmedämmung I und Raumabschluss E**)



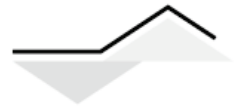
Tragfähigkeit R



Raumabschluss E



Wärmedämmung I



Anforderungen für brandabschnittsbildende Bauteile

■ Kriterium I (Wärmedämmung)

- $\Delta T \leq 140\text{k}$ (mittlerer Temperaturanstieg)
- $\Delta T \leq 180\text{k}$ (maximaler Temperaturanstieg)



■ Kriterium E (Raumabschluss)

- kein Durchtritt von Flammen oder heisser Gase (keine Entzündung eines Wattebausches)
- keine Spalte oder Öffnungen, die über bestimmte Abmessungen hinausgehen



Nachweis der brandabschnittsbildenden Funktion

• Brandversuche

- zeitaufwändig und teuer
- erforderlich für jede Konstruktion
- Optimierung der Konstruktion möglich

• Rechnerischer Nachweis

- geringer Zeitaufwand und billig
- konservativ im Vergleich zu Brandversuchen



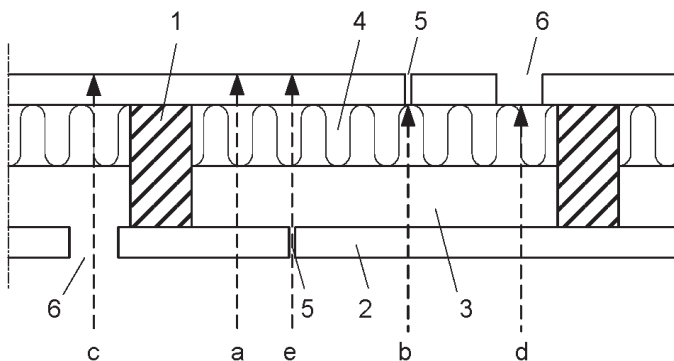


Berechnungsmodelle

- **Eurocode 5, Teil1-2 (EN 1995-1-2), Anhang E**

- informativ, d.h. nicht in allen Ländern gültig (vgl. nationale Anhänge)
- basiert auf geringe Anzahl von Brandversuchen, d.h. ihre Anwendung ist stark begrenzt

$$t_{\text{ins}} = \sum_{i=1}^{i=n} t_{\text{ins},i} \quad [\text{min}]$$



Key

- 1 timber frame member
 - 2 panel
 - 3 void cavity
 - 4 cavity insulation
 - 5 panel joint
 - 6 position of services
- a – e heat transfer paths



Neues Berechnungsmodell

- In Anlehnung an Additionsmethode (EN 1995-1-2)
- Berechnung des Feuerwiderstandes t_{ins} als Summe der Feuerwiderstände der einzelnen Schichten t_i

$$t_{\text{ins}} = \sum_i t_i$$



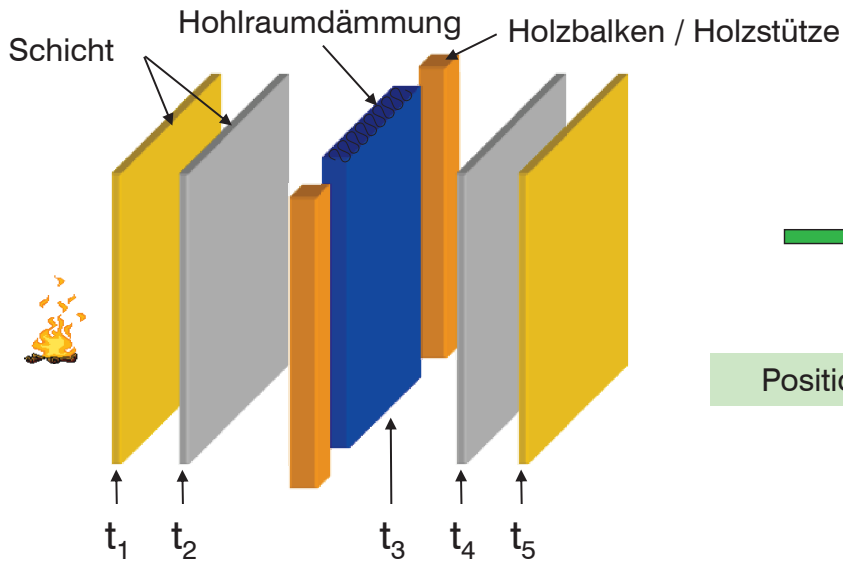
“Fire safety in Timber Buildings”
Technical guideline for Europe
SP Report 2010



Neues Berechnungsmodell

- In Anlehnung an Additionsmethode (EN 1995-1-2)
- Berechnung des Feuerwiderstandes t_{ins} als Summe der Feuerwiderstände der einzelnen Schichten t_i

$$t_{ins} = \sum_i t_i$$



$$t_i = t_{0,i} \cdot k_{pos,i} \cdot k_{j,i}$$

Grundzeitwerte

Positionsbeiwerte

Fugenbeiwert

Vergrößerung der Brandlast



Naturbrandversuch Tsukuba (Japan), 6. März 2007

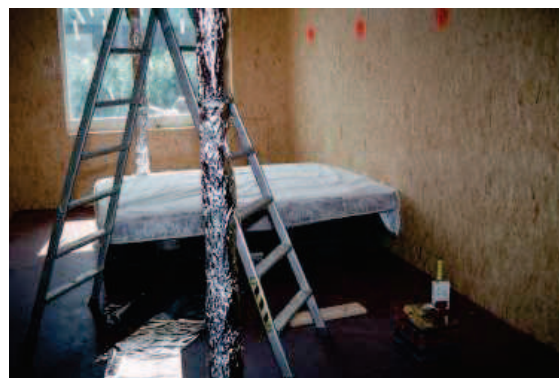
Experimentelle Untersuchungen zu Brandschutzkonzepten

- Expo02 temporäre Hotelbauten
- 6 Grossnaturbrandversuche
 - 3 mit aktiven techn. Massnahmen
 - 3 ohne aktive techn. Massnahmen
- Brandausbreitung
- Einfluss von brennbaren Oberflächen im Raum
- Wirksamkeit von Sprinkleranlagen



Zündung und Brandlast

- Mobile Brandlast
 - Matratze aus Schaumstoff
 - 11 Paletten aus Holz
- Zündung
 - 4 dl n-Heptan unter Matratze



Brandlast	BÜ nbb	BÜ bb	BÜ nbb demo
Mobile Brandlast	234 MJ/m ²	211 MJ/m ²	237 MJ/m ²
Immobilie Brandlast	129 MJ/m ²	644 MJ/m ²	129 MJ/m ²
Totale Brandlast	363 MJ/m ²	855 MJ/m ²	366 MJ/m ²

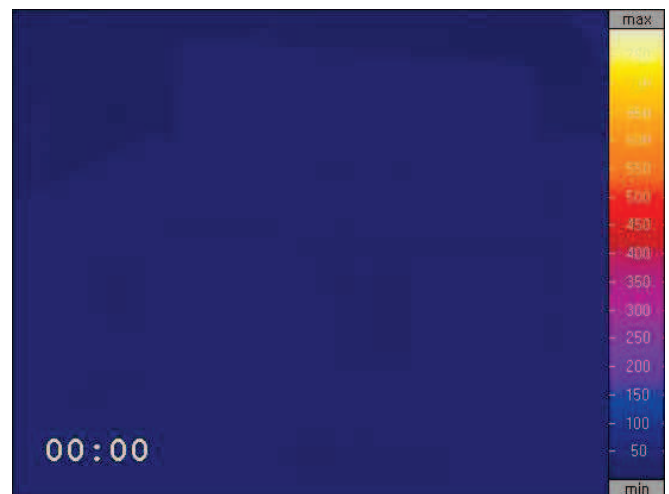
Einfluss von brennbaren Oberflächen im Brandraum

brennbar



Entzündung Matratze	ca. 01'40" min
Flashover	ca. 04'30" min
Fensterversagen	ca. 07 min
Versuchsdauer	ca. 20 min

nicht-brennbar



Entzündung Matratze	ca. 01'30"
Flashover	ca. 06 min
Fensterversagen	ca. 42 min
Versuchsdauer	ca. 45 min

Einfluss von brennbaren Oberflächen im Brandraum

Brennbar



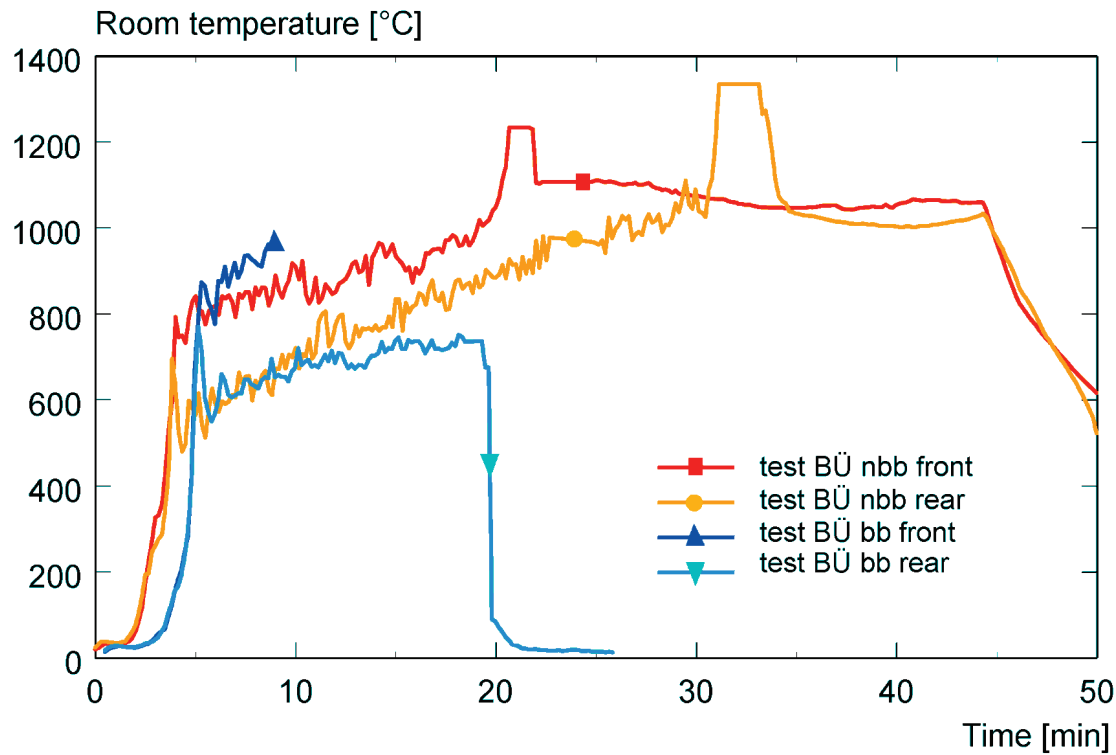
Nichtbrennbar



Brandheftigkeit nach 7 Minuten



Temperaturen im Brandraum



Brandausbreitung:
kein Durchbrand vom
unteren ins obere Geschoss

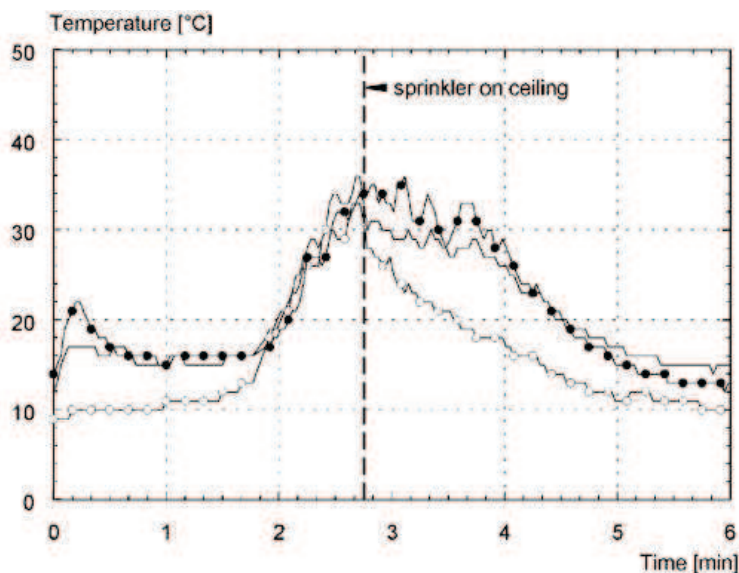


Wirksamkeit von Sprinkleranlagen



Wirksamkeit von Sprinkleranlagen

- Schnellansprechend ($RTI\text{-Wert}=35\text{-}50\text{ms}^{0.5}$)
- Ansprechtemperatur
 - Deckensprinkler: 57°C oder 68°C
 - Wandsprinkler: 68°C



Wirksamkeit von Sprinkleranlagen



rothoblaas

Projekt SOFIE

- Projekt SOFIE vom Institut IVALSA, Trento
- Holzbauten aus Brettsper Holz
- Mehrere Brandversuche an Wand- und Deckenbauteile
- Grossnaturbrandversuch an 3-geschossigem Holzgebäude

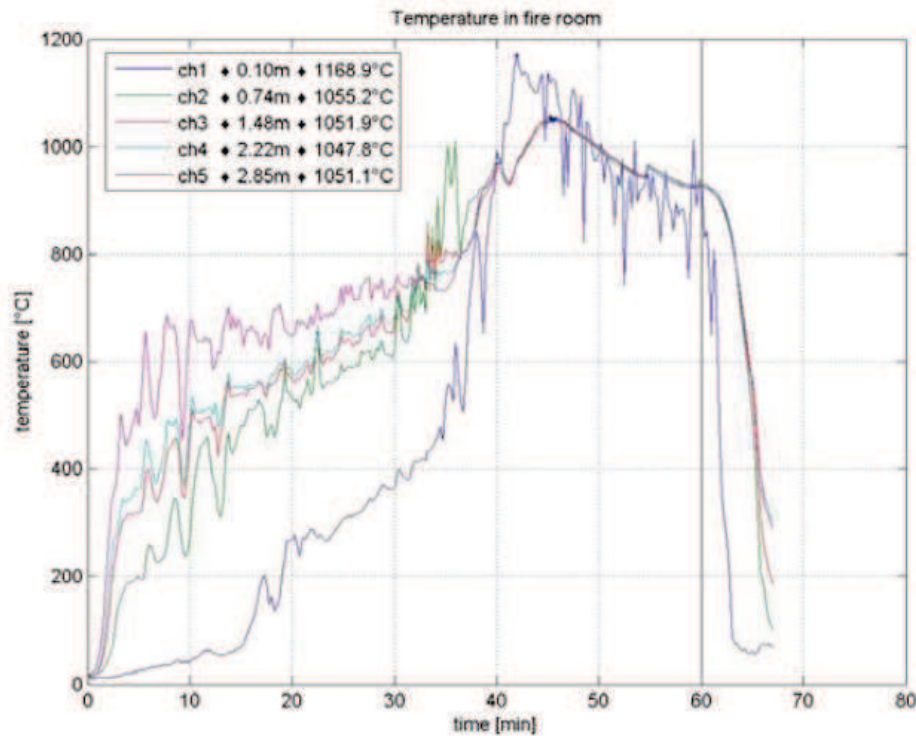
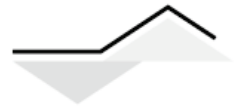


Aufbau



Brandlast = 790 MJ/m²





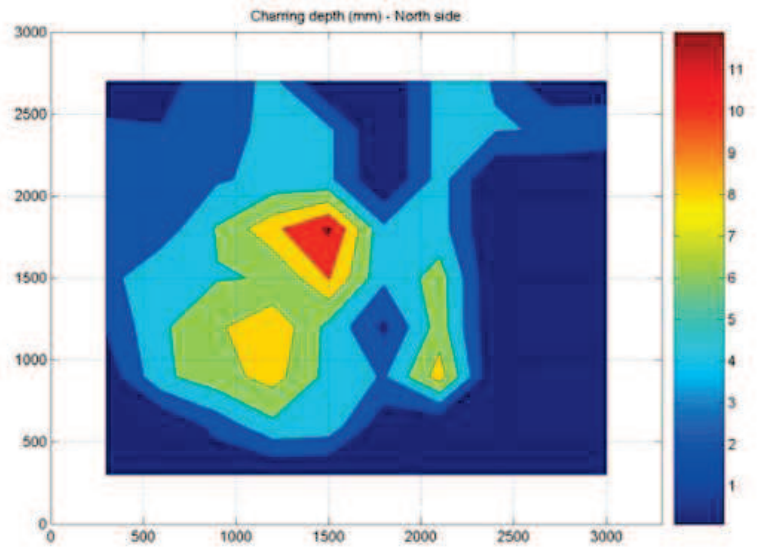
Bemerkung:
Beide Fenster
erst nach 36 Minuten
vollständig zerbrochen

Brandausbreitung: kein Durchbrand vom unteren ins obere Geschoss

Naturbrandversuch Tsukuba (Japan), 6. März 2007



Schadensanalyse

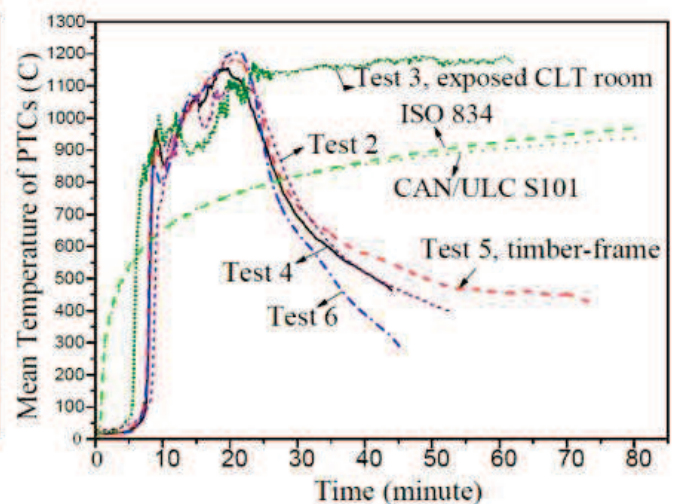
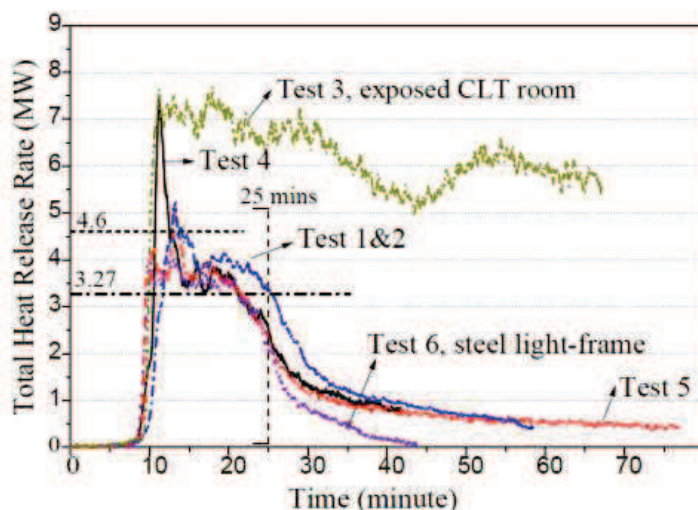


Naturbrandversuch Tsukuba (Japan), 6. März 2007



Einfluss von brennbaren Oberflächen im Brandraum

Combustible and non-combustible
construction:
an experimental investigation
Carleton University, Ottawa, Canada

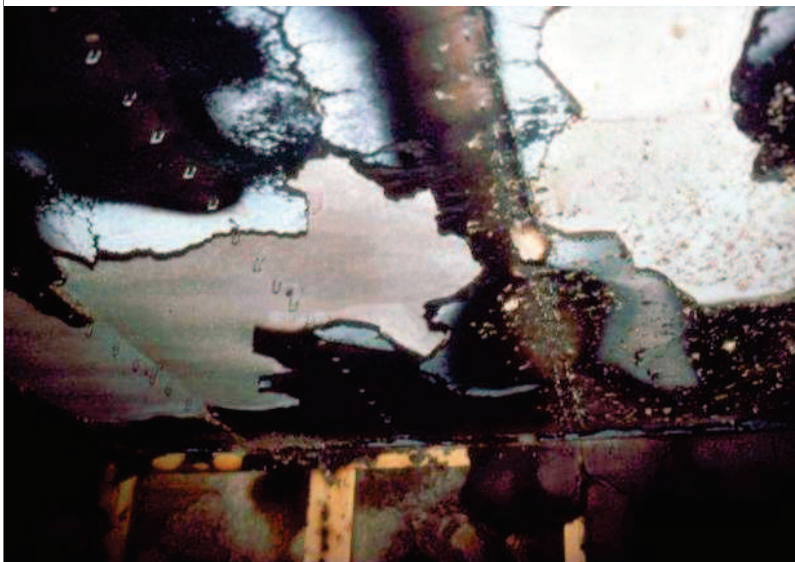
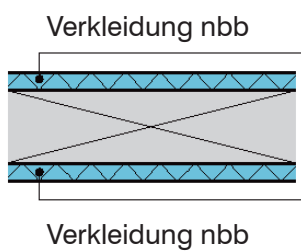


Lösungsansatz: Sprinkleranlagen

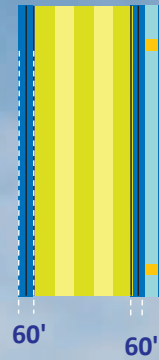


rothoblaas

Lösungsansatz: Kapselung



Milano, Via Cenni



Dank an Andrea Bernasconi



Ergebnisse der Grossversuche

- Brennbare Oberflächen
 - Grosser Einfluss auf die Brandheftigkeit
- Sprinkleranlage
 - Brand in kurzer Zeit gelöscht
 - Keine Brandausbreitung über die Fassade
- Brandabschnittsbildung
 - Kein Durchbrand auch nicht bei brennbarer Isolation sofern diese ausreichend geschützt wird
- Detailgestaltung
 - Grosser Einfluss auf die Brandsicherheit
 - Massivholz zeigt gute Robustheit im Brandfall

Brandschutz im Holzbau – Wo steht das Holz?

- Im Holzbau wurden unter Vernetzung von Holzbranche, Forschung und Behörden enorme Anstrengungen zum Brandschutz unternommen und viel erreicht.
- Grundlagen und Berechnungsmodelle liegen vor. Es liegt nun an allen Beteiligten der Holzbranche und der Planer, diese Möglichkeiten zu nutzen und sicher und wirtschaftlich umzusetzen.

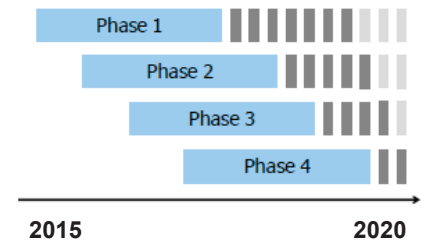
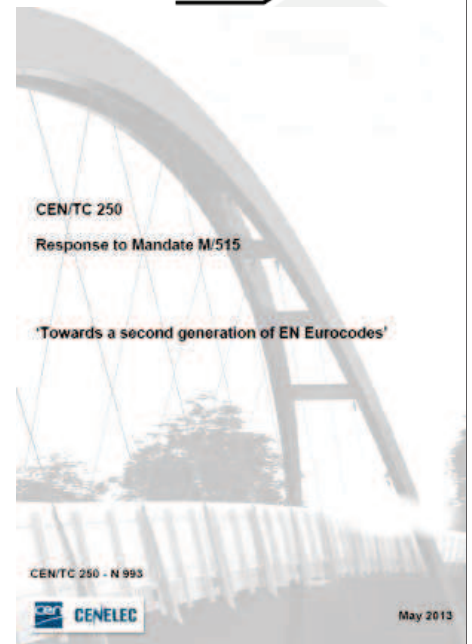
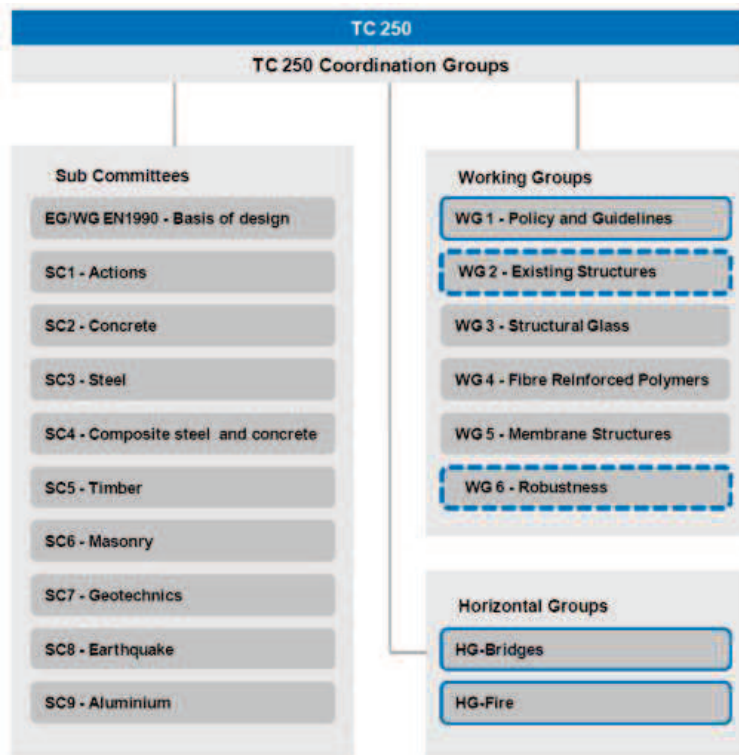


Literatur (Auszug)

- M. Klippel, A. Frangi: "Brandsicherheit von verklebten tragenden Holzbauteilen", Spezialausgabe Brandschutz; Ernst & Sohn, Dezember 2014.
- 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; 68: 81–99.
- M. Klippel, A. Frangi, E. Hugi: "Experimental analysis on the fire behavior of finger-jointed timber members", Journal of Structural Engineering (ASCE) 2014; 140(3): 04013063-1–12.
- A. Frangi, M. Fontana: "Fire safety of multistorey timber buildings", Structures and Buildings 2010; 163: 213–226.
- A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana: "Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies", Engineering Structures 2010; 32: 1184–1195.
- C. Erchinger, A. Frangi, M. Fontana: "Fire design of steel-to-timber dowelled connections", Engineering Structures 2010; 32: 580–589.
- A. Frangi, M. Knobloch, M. Fontana: "Fire design of timber-concrete composite slabs with screwed connection", Journal of Structural Engineering (ASCE) 2010; 136: 219–228.
- A. Frangi, M. Fontana, E. Hugi, R. Jöbstl: "Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire", Fire Safety Journal 2009; 44: 1078–1087.
- A. Frangi, M. Knobloch, M. Fontana: "Fire design of timber slabs made of hollow core elements", Engineering Structures 2009; 31: 150–157.
- A. Frangi, C. Erchinger, M. Fontana: "Charring model for timber frame floor assemblies with void cavities", Fire Safety Journal 2008; 43: 551–564.
- A. Frangi, M. Fontana, M. Knobloch: "Fire design concepts of tall timber buildings", Structural Engineering International 2008; 18: 148–155.
- A. Frangi, M. Fontana: "Fire Performance of Timber Structures under Natural Fire Conditions", Fire Safety Science 2005; 8: 279–290.
- A. Frangi, M. Fontana: "Charring rates and temperature profiles of wood sections", Fire and Materials 2003; 27: 91–102.

Aktuelle Entwicklungen

■ Revision Eurocodes



Aktuelle Entwicklungen

■ Revision Eurocode 5

→ EN 1995-1-2:2020



→ WG 4: Structural Fire Design (Chairman A. Frangi)

■ COST Action FP1404 (Chairman J. Schmid)



www.costfp1404.com

Fire safe use of bio-based building products

Aktuelle Entwicklungen: Revision Eurocode 5

Berechnungsverfahren

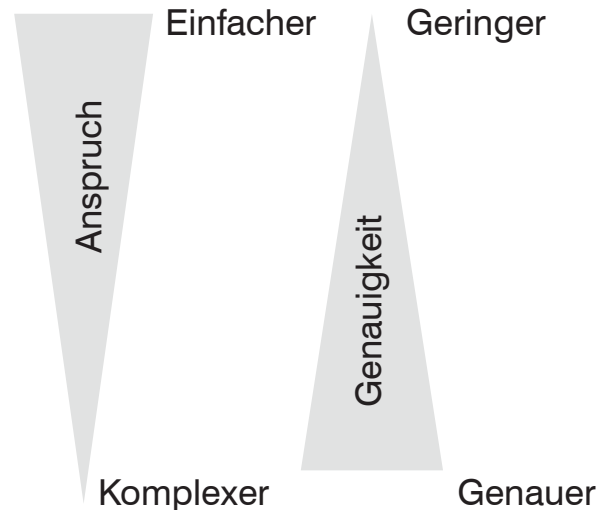
4 Tabellenwerte

- 4.1 Anwendungsbereich
- 4.x CLT
-

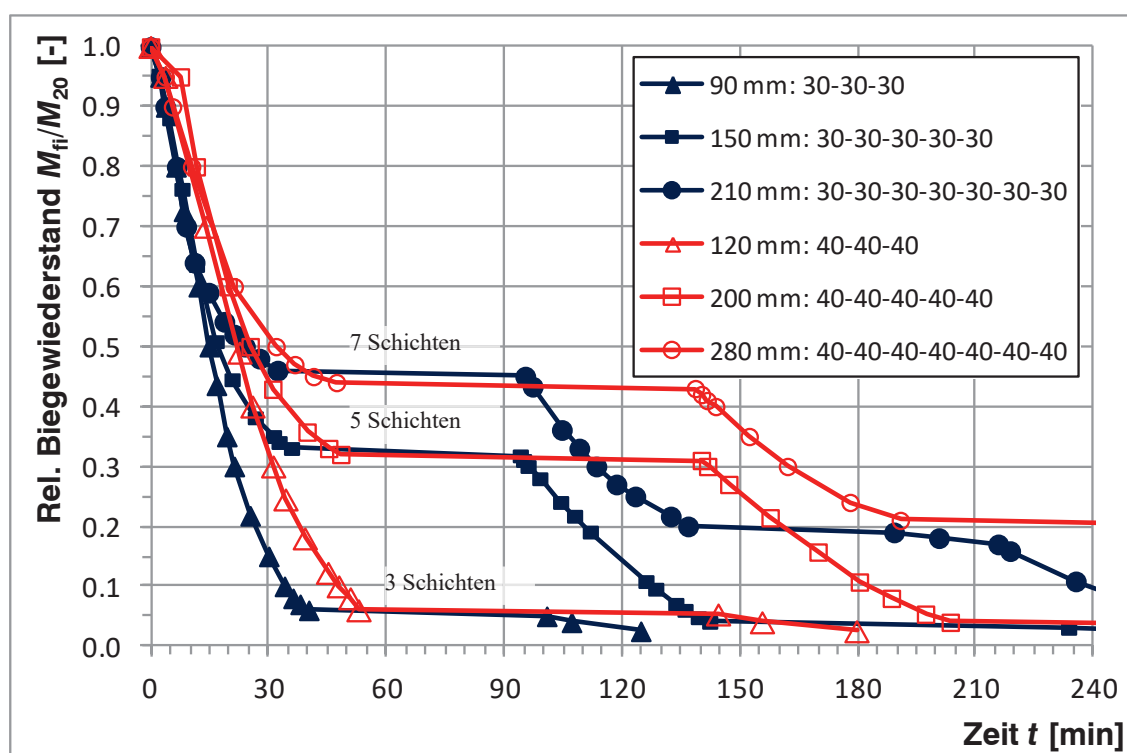
5 Vereinfachte Berechnungsverfahren

- 5.1 Allgemeines
- 5.2 Methode des effektiven Querschnittes
-

6 Genauere Berechnungsverfahren



Bemessung mit Tabellenwerten (CLT ?)



Technical content of Revision of EN 1995-1-2:2020

- Simplification (“only one design principle shall be available”)
 - Delete the Reduced Properties Method!
 - Only Reduced Cross-section Method will be given
- Harmonisation (Annexes should be normative and moved to the main part)
 - Annexes C, D und E will disappear!
- Improvement / extension
- Cross-laminated timber panel (new rules)
- Timber-concrete-composite elements (new rules)
- Connections (Improved rules)
- Failure of claddings (Improved rules)
- Separating function (Improved rules)
- Same number of articles



Literatur (Auszug)

- Just A., Kraudok K., Schmid J., Östman B. (2015), Protection by gypsum plasterboards - state of the art, Proceedings of the 1st European Workshop Fire Safety of Green Buildings, October 6-7, 2015, Berlin.
- Just A., Tiso M. (2016), Improved fire design model for timber frame assemblies, Proceedings of INTER Meeting, August 16-19, 2016, TU Graz, Graz, Austria.
- Kleinhenz M., Winter S., Dietsch P. (2016), Eurocode 5 – A halftime summary of the revision process, Proceedings of 14th World Conference on Timber Engineering (WCTE), August 22-25, 2016, Vienna, Austria.
- Klippel M., Schmid J., Frangi A. (2012), The Reduced Cross-section Method for timber members subjected to compression, tension and bending in fire, Proceedings of CIB-W18 Meeting, August 27-30, 2012, Växjö, Sweden.
- Klippel M., Schmid J., Frangi A. (2016), Fire Design of CLT, Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 and FP1404, March 10-11, 2016, Stockholm, Sweden.
- Klippel M., Schmid J. (2017), Design of cross-laminated timber in fire, Structural Engineering International, Paper in Press.
- Palma P., Frangi A. (2016), A framework for finite element modelling of timber connections in fire, Proceedings of 9th International Conference on Structures in Fire, June 8-10, 2016, Princeton University, Princeton, USA.
- Palma P., Frangi A. (2016), Fire design of timber connections – assessment of current design rules and improvement proposals, Proceedings of INTER Meeting, August 16-19, 2016, TU Graz, Graz, Austria.
- Schmid J., König J., Just A. (2012), The reduced cross-section method for the design of timber structures exposed to fire-background, limitations and new developments, Structural Engineering International 2012; 22: 514–522.
- Schmid J., Klippel M., Just A., Frangi A. (2014), 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; 68: 81–99.
- Tiso M., Just A. (2017), Fire protection provided by insulation materials – new design approach for timber frame assemblies, Structural Engineering International, Paper in Press.

Aktuelle hot topic

Tall timber buildings

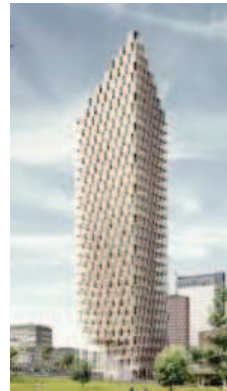
- Severity of design fires
- Contribution of timber to the fire load
- Charring rate of wood as a function of fire exposure
- Self-extinguishment of charred wood
- Fire performance of encapsulated timber
- Dangers of combustible wooden facade claddings
- Effect of different combinations of passive and active fire protection
- Quantitative risk assessment, to include all these items



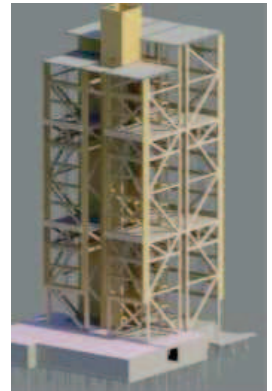
Canada



Österreich



Schweden



Norwegen

Brandschutz im Holzbau – Forschungsfelder in Zukunft

- Revision Eurocode 5
 - Bauteile (CLT, HBV, Verkleidungen, usw.)
 - Verbindungen, Anschlüsse
 - Bemessungsgrundlagen für Feuerwiderstand > als 60 Min.
- Performance based design
 - Grundlagen zum Abbrandverhalten
 - Naturbrandbemessung
- Hochhäuser



Brandschutz im Holzbau – Risiken in Zukunft

- Zu viele Normen,
zu hohe Komplexität,
zu grosse Vielfältigkeit
- Keine Koordination
- Focus nur auf «genauere»
Berechnungsverfahren
- Focus nur auf Performance
based design
- Ausbildung, Weiterbildung
vernachlässigt
- Ausführung, Qualitäts-
sicherung vernachlässigt
- Details, Robustheit

