

# Feuerwiderstand von feuerverzinkten Stahl- und Verbundträgern

GAV-Forschungskolloquium 2023

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß**

Justus Frenz, M.Sc.

**Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz**

**Technische Universität Braunschweig**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger

Maria-Mirabela Firan, M.Sc.

Lehrstuhl für Metallbau

Technische Universität München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau

RWTH Aachen

Mark Huckshold

Institut Feuerverzinken GmbH

Düsseldorf

# Inhalt



- Teil I Einfluss einer Feuerverzinkung auf das Erwärmungsverhalten von Stahlbauteilen
- Teil II Feuerwiderstand von feuerverzinkten Verbundträgern aus höher- und hochfesten Baustählen
- Teil III Übergang der Erkenntnisse aus der Forschung in Regelwerke
- Teil IV Ausgeführte Beispiele aus der Praxis

# Teil I Feuerwiderstand von feuerverzinkten, tragenden Stahlkonstruktionen im Brandfall

IGF-Vorhaben 18887 N

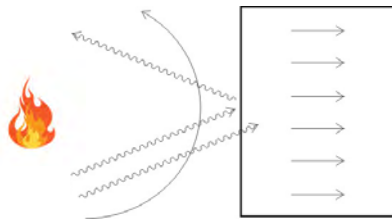


Die IGF-Vorhaben (Nr.18887 N, des Gemeinschaftsausschuss Verzinken .e.V, 40470 Düsseldorf und IGF 19105 N, FOSTA P 1162), wurden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Forschungsprojekt wurde an der Technischen Universität München bearbeitet.



# Wärmetransport im Brandfall

Konvektion („Wärmefluss“)



Wärmeleitung

Strahlung (elektromagnetisch)

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_{res} \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

$\dot{h}$  Netto Wärmestrom [W]

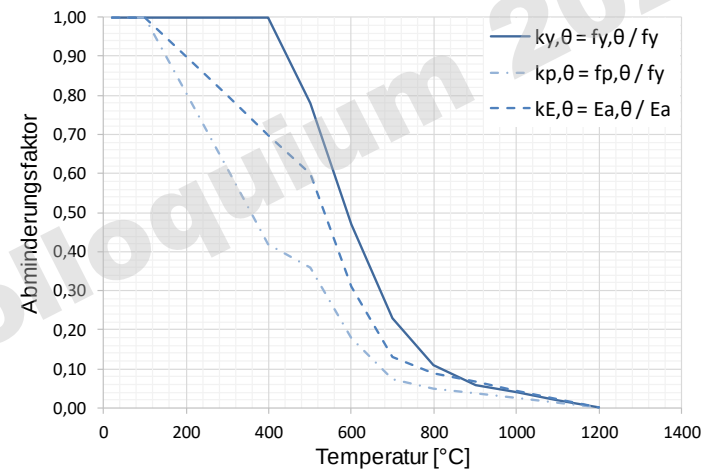
$\Phi$  Konfigurationsfaktor [-]

$\varepsilon_{res}$  Emissionsgrad [-]

$\sigma$  Stephan-Boltzmann-Konstante:  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$

$\theta_r$  Strahlungstemperatur des Brandes [°C]

$\theta_m$  Temperatur der Bauteiloberfläche [°C]



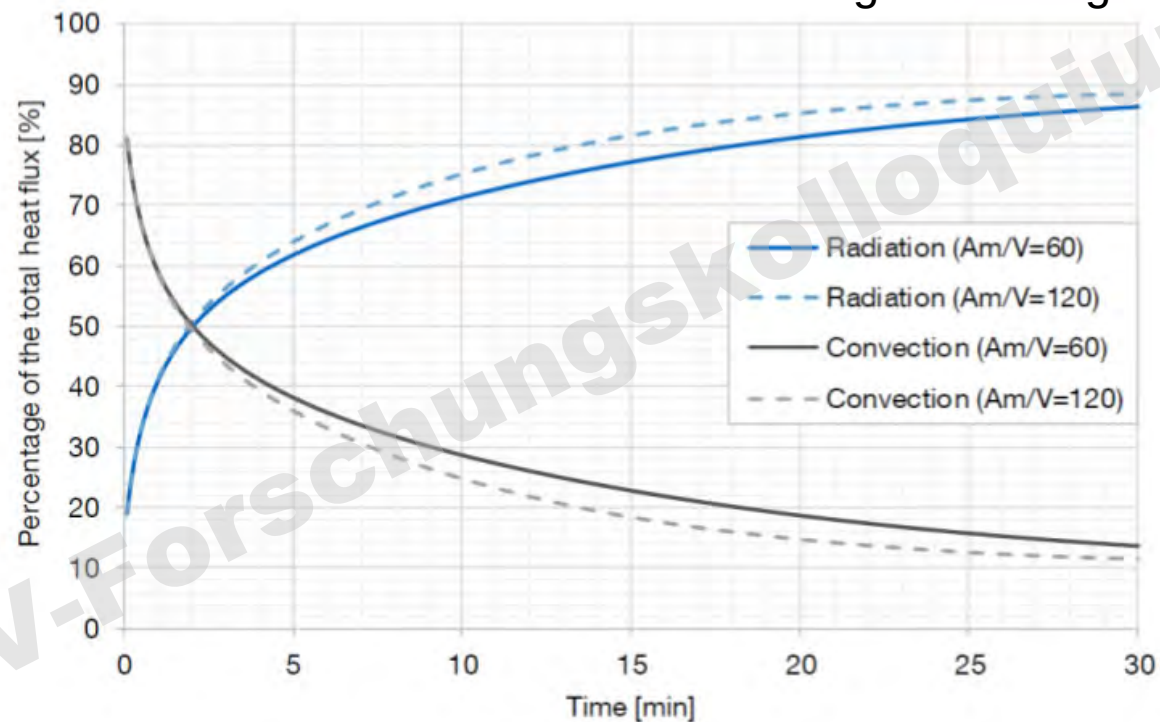
$\varepsilon_m$  Emissivität der Bauteiloberfläche (0,7)

R 30 ungeschützt nur bei sehr kompakten Profilen erreichbar!

Feuerverzinken kann einen Einfluss auf den Emissionsgrad nehmen!

# Aufteilung Wärmestrom bei ETK

Anfangs überwiegend Konvektion



# Abhängigkeit der Verzinkung von der Legierung des Stahls

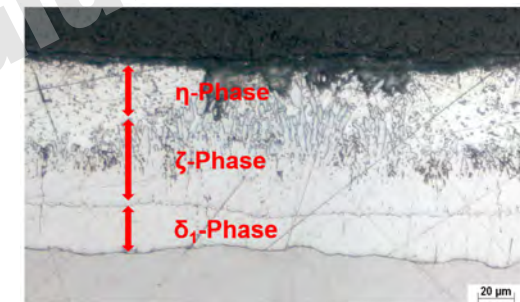
Stahlzusammensetzung nach DIN EN ISO 14713-2:2020-05

| Kategorie | Bezeichnung                                                     | Oberflächeneigenschaften  |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|
| A         | Niedrigsilizium-Bereich: $\leq 0,03\%$ Si <u>und</u> $0,02\%$ P | Silbrig glänzend          |
| B         | Sebisty-Bereich: $> 0,14\%$ bis $0,25\%$ Si                     | Silbrig glänzend bis matt |
| C         | Sandelin-Bereich: $> 0,03\%$ bis $0,14\%$ Si                    | Matt, teils grießig       |
| D         | Hochsilizium-Bereich: $> 0,25\%$ Si                             | Matt, grau                |

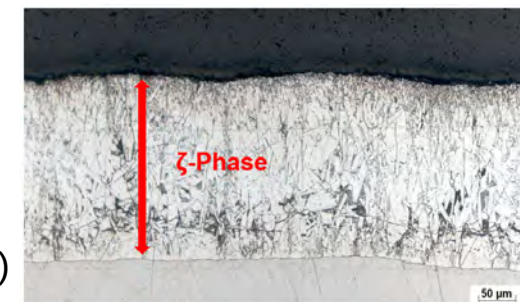
Die Ausbildung des Zinküberzuges ist abhängig von

- der chemischen Zusammensetzung, insbesondere dem Silizium- und Phosphorgehalt der Stähle
- der Topografie der Stahloberfläche und von
- den Verzinkungsbedingungen (Schmelztemperatur, Tauchdauer etc.)

Schliffbild Kategorie A



Schliffbild Kategorie D



# Veränderung der verzinkten Oberfläche

Probekörper Kategorie A

Vor Temperatureinwirkung



Nach Temperatureinwirkung



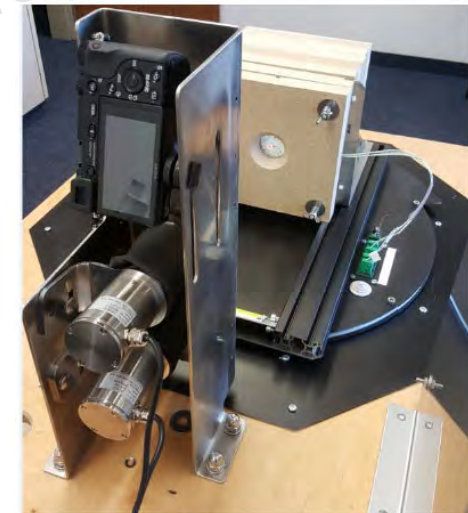
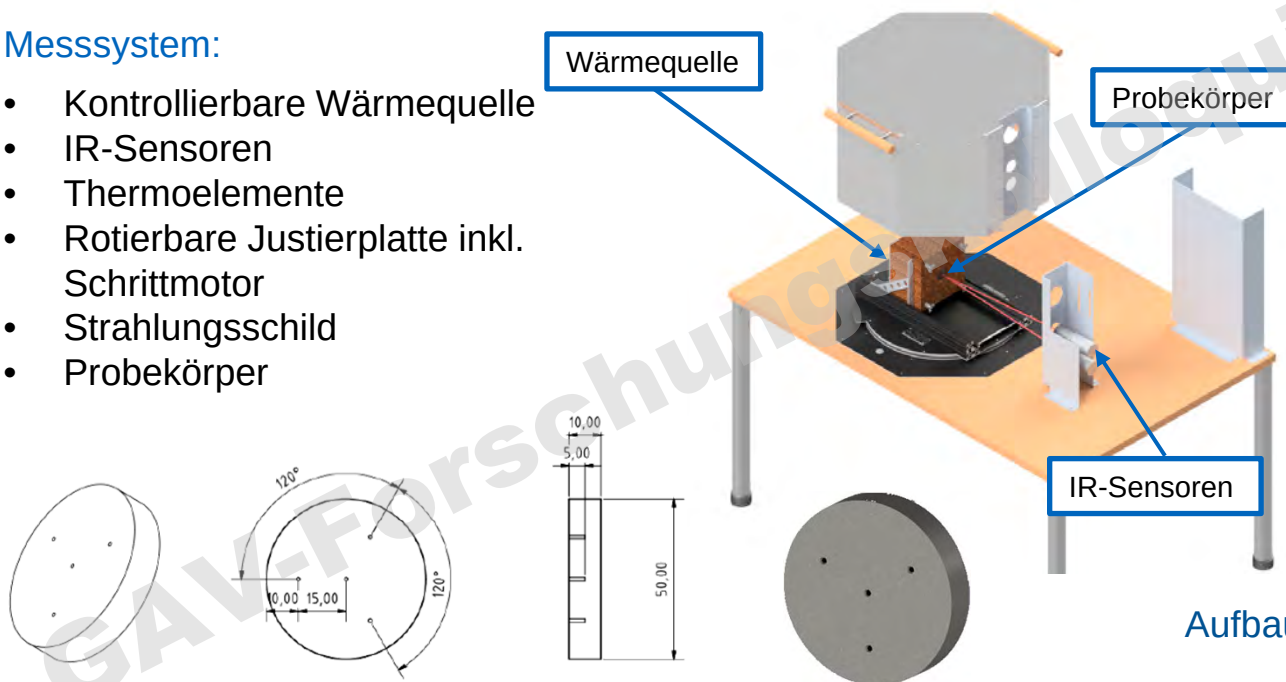


# Emissivity–Performance Test (E-PT)

- Versuchsstand – im Rahmen des Forschungsprojekts konzipiert und gebaut
- Temperaturmessung mittels Infrarotsensoren

## Messsystem:

- Kontrollierbare Wärmequelle
- IR-Sensoren
- Thermoelemente
- Rotierbare Justierplatte inkl. Schrittmotor
- Strahlungsschild
- Probekörper

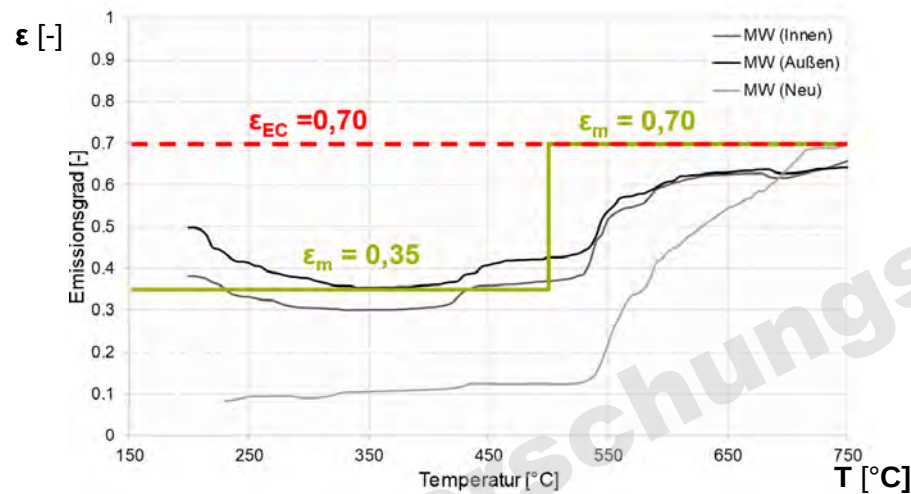


Aufbau Kleinversuchsstand

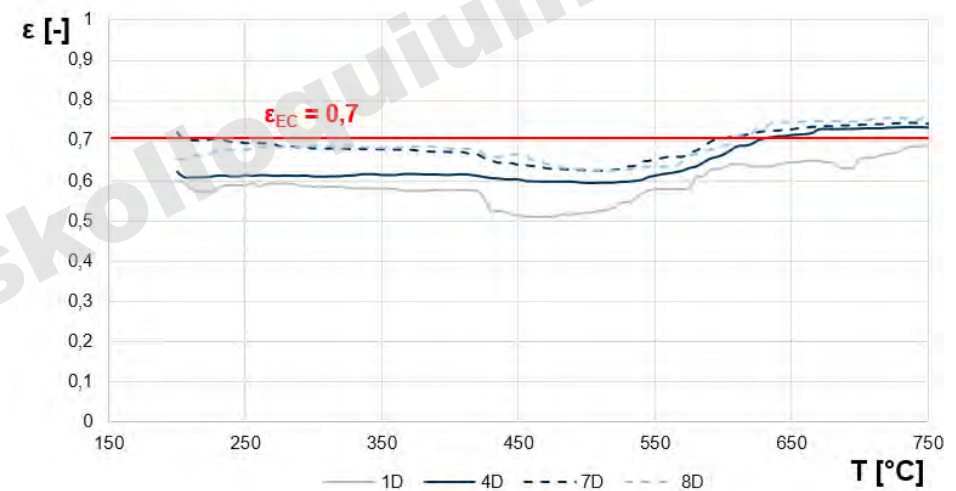


# Emissionsgradänderung

Kategorie A



Kategorie D



gestrichelt: im Freien gelagert\*

\*Bei zuvor ungünstiger Lagerung

durchgezogen: innen gelagert\*

# Ergebnisse Brandversuch

## Realmaßstäbliche Brandversuche



| Stahlsorte             | $\epsilon_m (\leq 500\text{ °C})$ | $\epsilon_m (> 500\text{ °C})$ |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Kohlenstoffstahl       | 0,7                               |                                |
| HDG-Stahl <sup>a</sup> | 0,35                              | 0,7                            |

<sup>a</sup> Nach EN ISO 1461 feuerverzinkter Stahl mit einer Stahlzusammensetzung entsprechend Kategorie A oder B nach EN ISO 14713-2, Tabelle 1.

## Ermittelte Emissivität

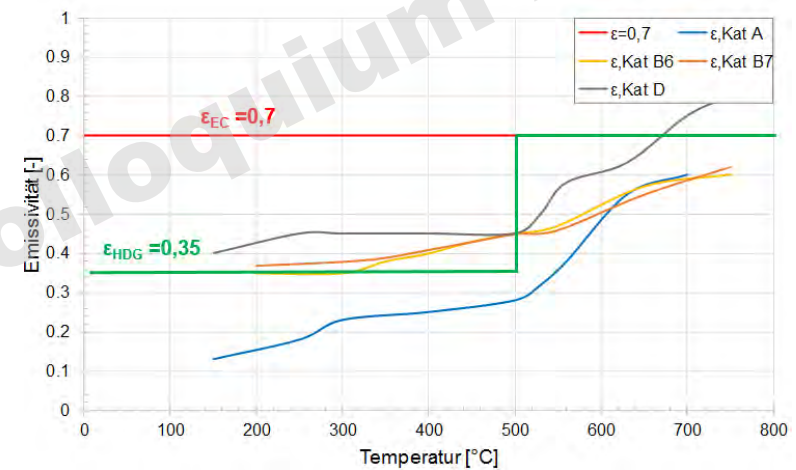


Tabelle 5.1. aus prEN 1993-1-2

In analoger Weise in DAST-Richtlinie 027 übernommen.

## Teil II Feuerwiderstand von feuerverzinkten Verbundträgern aus höher- und hochfesten Baustählen

IGF-Vorhaben 21536 N

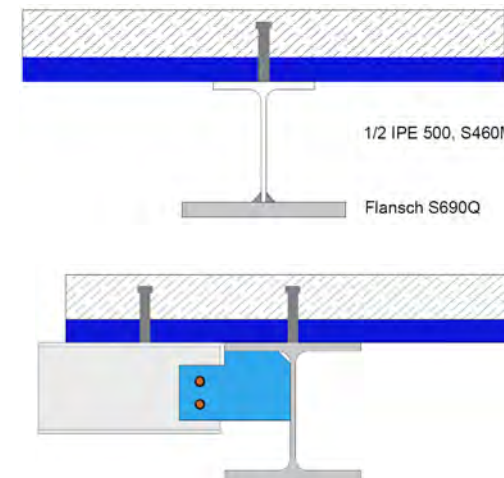


Das IGF-Vorhaben 21536 N "Feuerwiderstand von feuerverzinkten Verbundträgern aus höher- und hochfesten Baustählen" der GAV – Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V., Düsseldorf, FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf und Deutscher Ausschuss für Stahlbau DAST e.V., Düsseldorf wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wird am Lehrstuhl für Metallbau der Technischen Universität München, am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig und am Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau der RWTH Aachen durchgeführt.



# Zielsetzung Forschungsprojekt

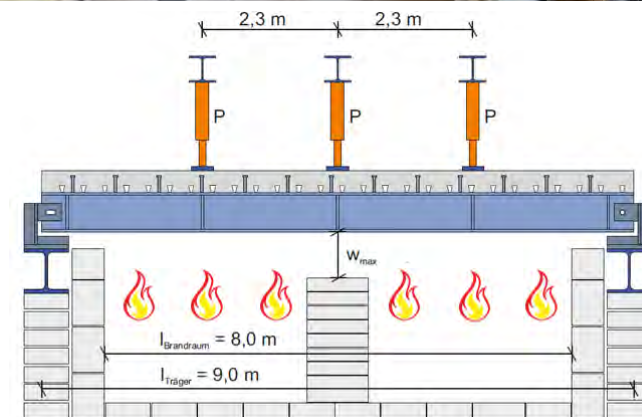
- **Reduktionsfaktoren** bei hohen Temperaturen für Stähle der Sorte S460M/ML und S690Q/QL
- **Verändertes Erwärmungsverhalten**, über die Trägerhöhe, von Verbundträgern mit feuerverzinkten Stahlprofilen
- Erforderlicher **Mindestverdübelungsgrad** im Brandfall bei feuerverzinkten Verbundträgern: doppel- und einfachsymmetrische Stahlprofile
- Empfehlungen zur **Ausbildung optimierter einfachsymmetrischer hybrider Querschnitte** des Stahlprofils aus hochfesten Stählen
- Erwärmungsverhalten von **Anschlüssen** zwischen **feuerverzinkten Trägern** im Brandfall
- Erwärmungsverhalten von **Anschlüssen** **feuerverzinkter Träger** an, mit einem reaktiven **Brandschutzsystemen** geschützten Trägern



# Brandversuche feuerverz. Verbundtr.

## Ausführung Verbundträger

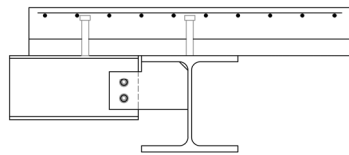
- 6 unterschiedliche Geometrien Stahlquerschnitt
- Stahlgüte: S460M und S690QL
- Stahl: Feuerverzinkt (Kategorie A/B)
- Trägerlänge:  $L = 9.0 \text{ m}$
- Betongurt:  $100 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  bzw.  $20 \text{ cm}$
- Holorib Trapezprofil und Kopfbolzendübel Typ SD 1,  $\varnothing = 22$
- (kurzer) Sekundärträger in Trägermitte
- Konstante mechanische Belastung über 3 Pressen
- ETK für 30 Minuten



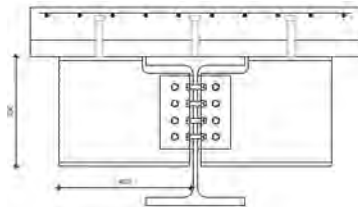


# Versuchsträger

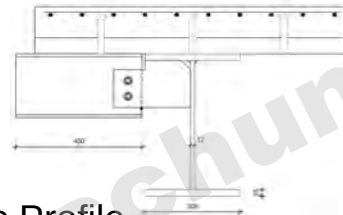
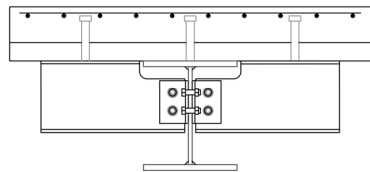
HEB300



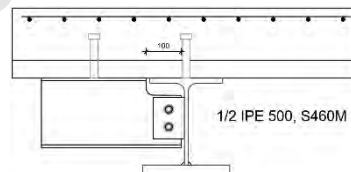
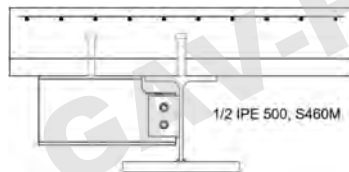
HEB450



Schweißprofil "HEA300" Schweißprofil "HEA450"



Optimierte Profile  
1/2 IPE500 mit Unterflansch breit & schmal

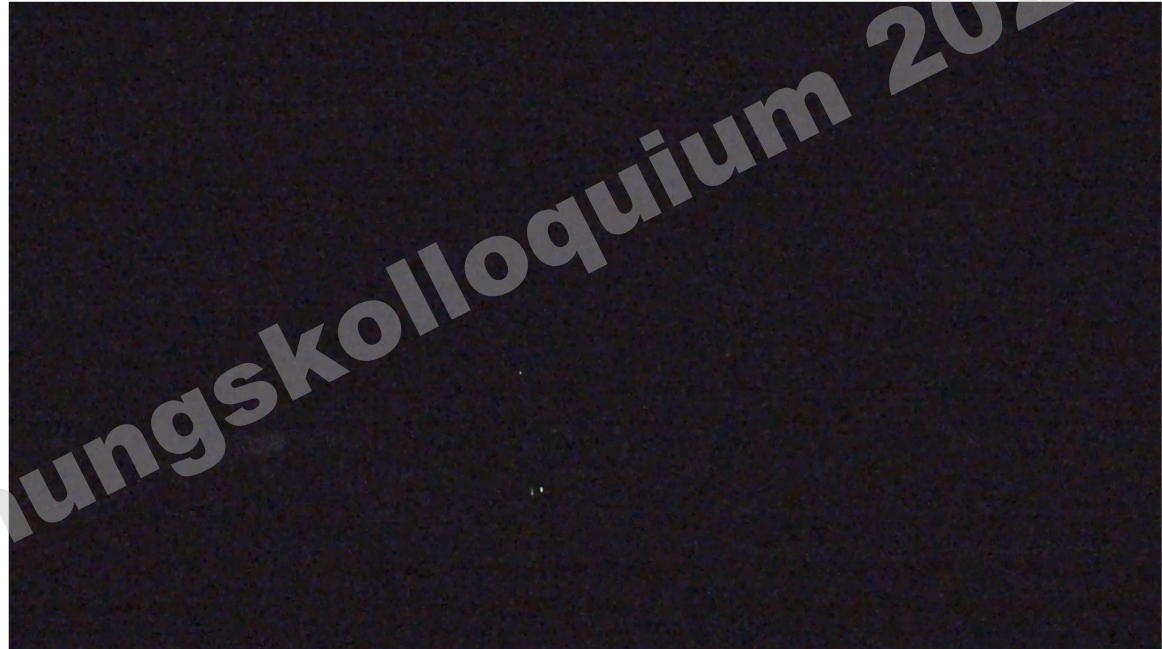


| Versuchs Nr.               | Träger Nr. | Trägerprofil     | Art und Material                      | Trägerhöhe | Verzinkt |
|----------------------------|------------|------------------|---------------------------------------|------------|----------|
| V1                         | Träger 1   | HEB 300          | Standard-Walzprofil, S460             | 300        | Ja       |
|                            | Träger 3   | Doppelsym. H=300 | Geschweiter QS, S690                  | 300        | Ja       |
| V2<br>(Prj. K.Tutzer, TUM) | Träger 7   | HEB 300          | Standard-Walzprofil, S355             | 300        | Nein     |
|                            | Träger 8   | HEB 300          | Standard-Walzprofil, S355             | 300        | Nein     |
| V3                         | Träger 5   | Einfachsym. QS1  | 1/2 IPE 500, S460 + UG 340x30mm, S690 | 280        | Ja       |
|                            | Träger 6   | Einfachsym. QS2  | 1/2 IPE 500, S460 + UG 250x30mm, S690 | 280        | Ja       |
| V4                         | Träger 2   | HEB 450          | Standard-Walzprofil, S460             | 450        | Ja       |
|                            | Träger 4   | Doppelsym. H=450 | Geschweiter QS, S690                  | 450        | Ja       |

## Verschiedene Anschlussdetails und Sekundärträger



## Brandversuche feuerverz. Verbundtr.



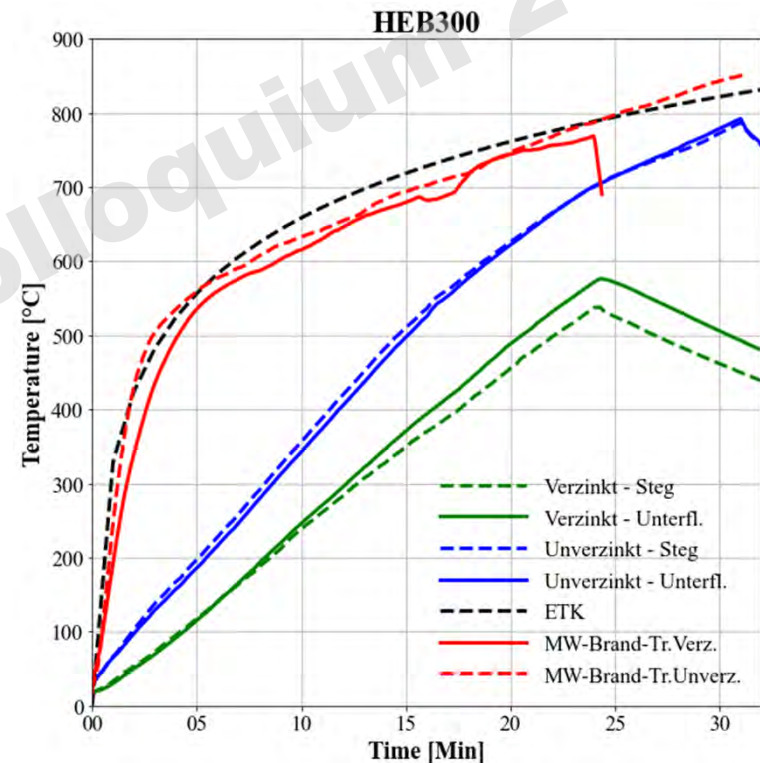
- Verbundträger Schweißträger H=300mm (li) und HEB300 (re)
- ETK für 24 Minuten, Mechanische Belastung



# Temperatur verzinkt-unverzinkt

Vergleich Temperaturentwicklung des verzinkten Stahlträgers HEB300 mit einem unverzinkten Stahlträger HEB300 (Prj. K.Tutzer, TUM)

- Hier Mittelwerte aller Schnitte der jeweiligen Träger
- Die unverzinkten Träger haben sich deutlich schneller erwärmt
- Vergleich der Werte des Oberflansches schwierig, da unterschiedliche Trapezblechprofile eingesetzt



# Numerische Untersuchungen

Numerische Simulation in zwei Schritten:

## Schritt 1. Thermisch-transiente Analyse

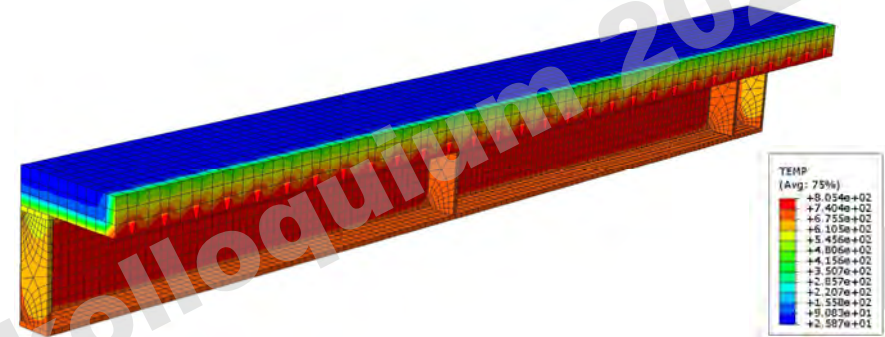
- Thermische Einwirkung eines Brandes  
→ **T-Modell**: Temperaturentwicklung im Querschnitt

## Schritt 2. Statisch-mechanische Analyse

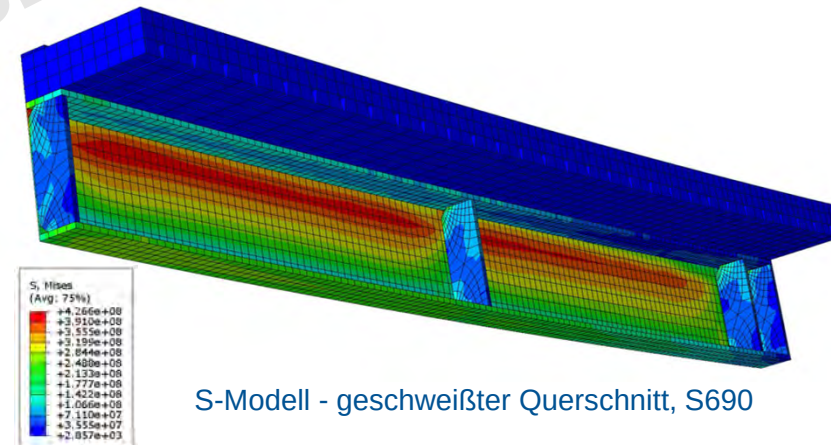
- Implementierung der zeitabhängigen Temperaturen im Bauteil aus Schritt 1
- Aufbringung mechanischer Belastung  
→ **S-Modell**: Reaktionen des Tragwerks auf die thermischen Einwirkungen bei gleichzeitiger mechanischer Belastung

Parameterstudie:

- Einfluss der Stahlgüte
- Einfluss der Geometrien und eines (stark) unsymmetrischen Stahlquerschnitts
- Einfluss des Verdübelungsgrades
- Einfluss Verbunddeckensystem gegenüber einer Massivdecke



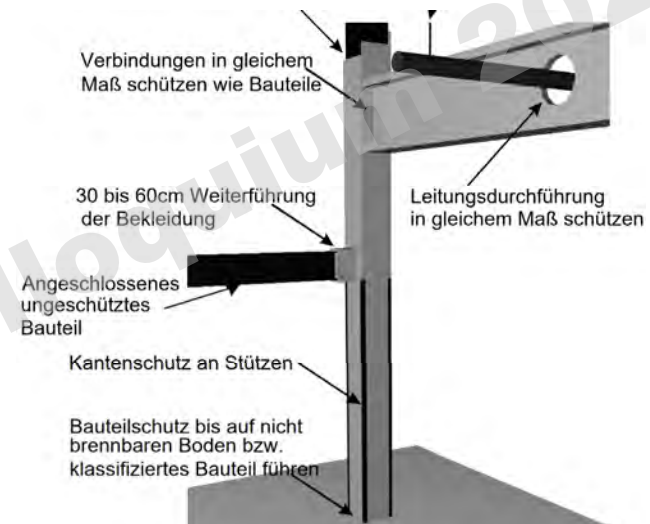
T-Modell - geschweißter Querschnitt, S690



S-Modell - geschweißter Querschnitt, S690

# Brandschutz im Anschlussbereich

- Erwärmung im Anschlussbereich langsamer als im Feld durch zusätzliches Material und Verschattung
- Für ungeschützte Anschlussbauteile: Weiterführung der Brandschutzbekleidung für 30 bis 60 cm (DIN 4102-4:2016-05)
- Untersuchung der Temperaturverteilung im Anschlussbereich, Wärmeeintrag aus Sekundär- in Hauptträger

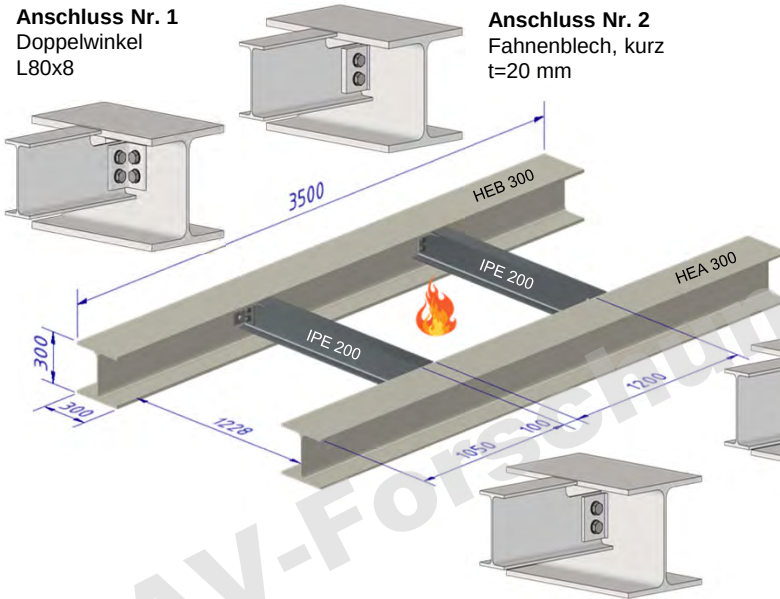


Heinemeyer, C.; Upmeyer, J.: Brandschutzbemessung im Stahlbau. In: Hosser, D., Zehfuß, J. (Hrsg.): Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes. Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 5 Beuth-Kommentar, 3. Auflage 2017 Berlin, Wien: Beuth Verlag GmbH, 2017

# Typische Anschlussdetails zwischen beschichteten und feuerverzinkten Trägern im Brandfall

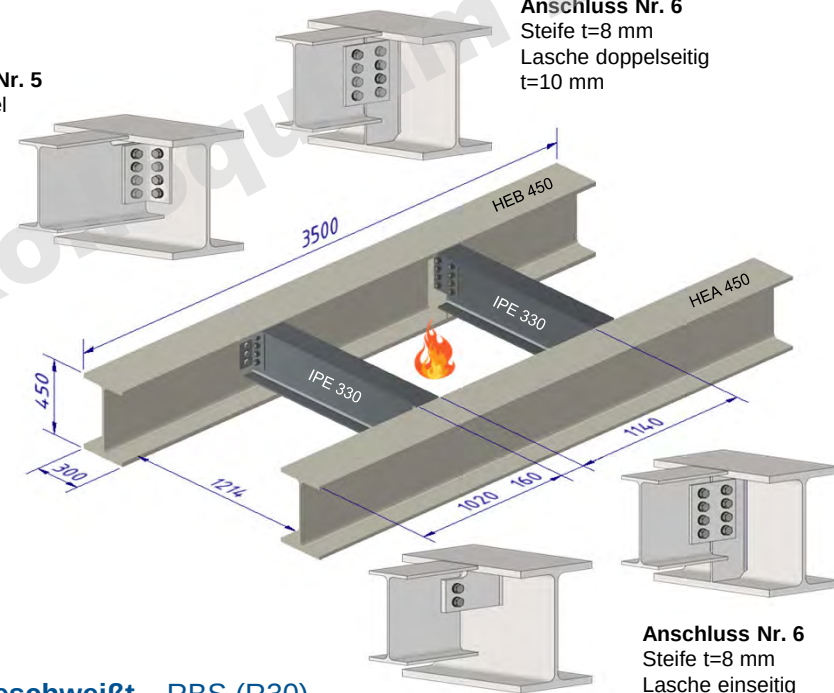
2 Realmaßstäbliche Brandversuche nach DIN EN 1363-1

**Anschluss Nr. 1**  
Doppelwinkel  
L80x8



**Anschluss Nr. 2**  
Fahnenblech, kurz  
t=20 mm

**Anschluss Nr. 5**  
Doppelwinkel  
L100x10



**Anschluss Nr. 6**  
Steife t=8 mm  
Lasche doppelseitig  
t=10 mm

**Anschluss Nr. 4**  
Fahnenblech, lang  
t=10 mm

**Hauptträger – RBS (R30)**  
**Sekundärträger – Feuerverzinkt**

**Anschluss Nr. 3**  
Fahnenblech, kurz  
t=10 mm

**Anschlusssteile geschweißt – RBS (R30)**  
**Anschlusssteile lose – Feuerverzinkt**

**Anschluss Nr. 7**  
Fahnenblech, lang  
t=20 mm

**Anschluss Nr. 6**  
Steife t=8 mm  
Lasche einseitig  
t=10 mm

# Analytische Temperaturermittlung

- Analytische Lösung für die Temperaturentwicklung  
Sekundärträger und Hauptträger



Funktion für die Beschreibung der  
Temperaturentwicklung entlang einer  
Laufkoordinate x

$$T(x) = a \times e^{b \times x} + c \times e^{d \times x}$$

$$\vartheta_i^{k+1} = \vartheta_i^k + \Delta\vartheta_{a,t} + \Delta\vartheta_t \left( \dot{W}(x, y, t, \vartheta) \right)$$

$\vartheta_i^k$  - Anfangstemperatur

$\Delta\vartheta_{a,t}$  - Temperatur für ungeschützten Stahl oder mit RBS geschützten Stahl

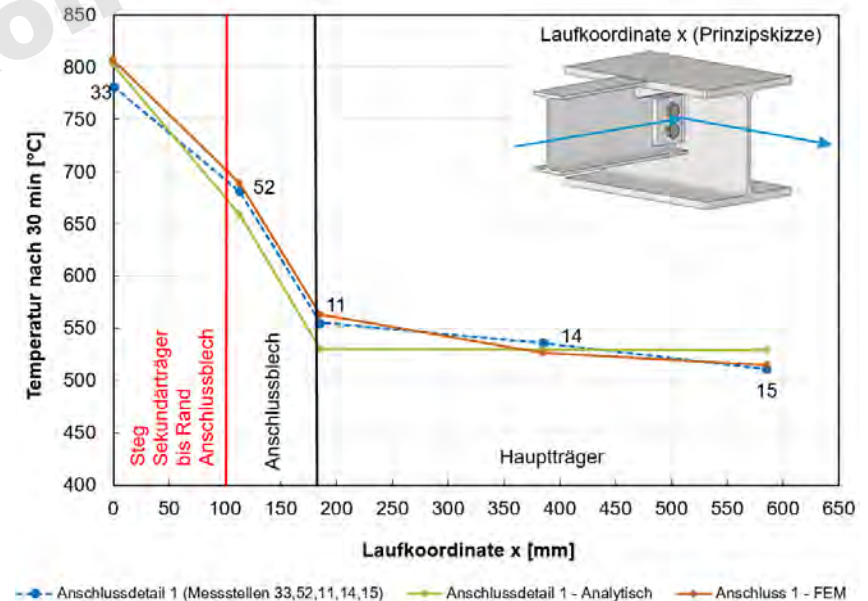
$\Delta\vartheta_t \left( \dot{W}(x, y, t, \vartheta) \right)$  - eindimensionale Wärmequelle

- Temperaturentwicklung Anschlussblech

$$\vartheta_i^{k+1} = \vartheta_i^k + \vartheta_{DGL} + \vartheta_{Wärmeaustausch}$$

$$\vartheta_{DGL} = \frac{4 \cdot a_i^k \cdot \Delta t}{V_i \cdot \Delta x} \cdot \left[ \frac{(\vartheta_{i+1}^k - \vartheta_i^k) \cdot A_{i+\frac{1}{2}}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) \cdot \left(1 + \frac{\lambda_i^k}{\lambda_{i+1}^k}\right)} - \frac{(\vartheta_i^k - \vartheta_{i-1}^k) \cdot A_{i-\frac{1}{2}}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1}) \cdot \left(1 + \frac{\lambda_i^k}{\lambda_{i-1}^k}\right)} \right]$$

Noch in Arbeit!





# Heißzugversuche

## Versuchskörper

- Knochenform,  $t = 20 / 30 \text{ mm}$
- Material S355, S460, S690
- Verzinkt/ nicht verzinkt

## Stationäre Versuche

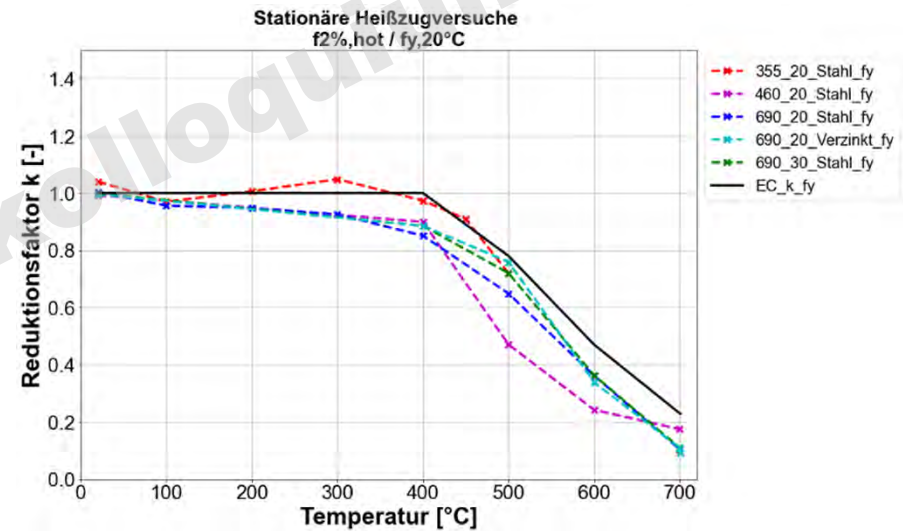
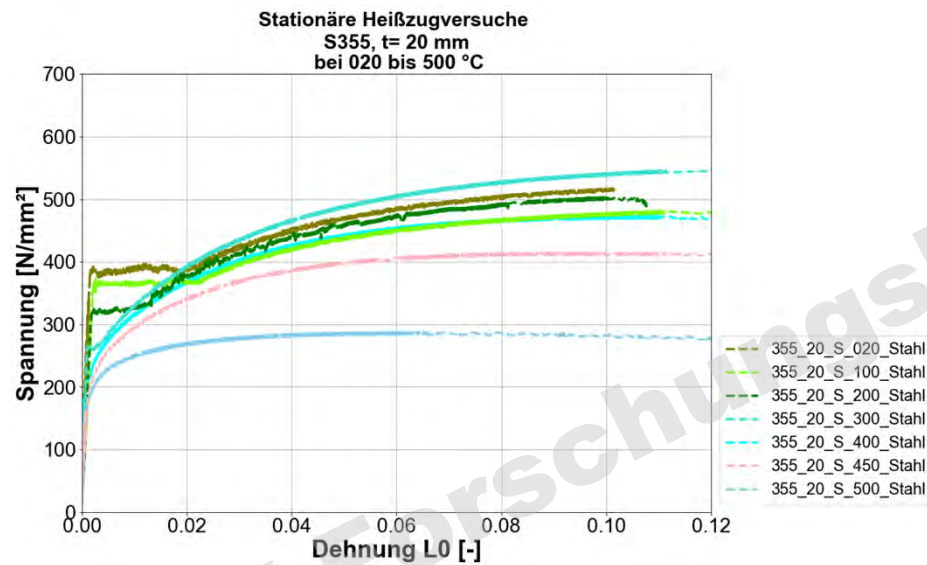
- E-Modul
- Festigkeit

## Instationäre Versuche

- Thermische Dehnung
- Transientes Kriechen
- Temperatur



# Heißzugversuche



## Teil III Übergang der Erkenntnisse aus der Forschung in Regelwerke

# Regelwerke

## DAST-Richtlinie 027

Ermittlung der Bauteiltemperatur feuerverzinkter Stahlbauteile im Brandfall

Verfahren nach DIN EN 1993-1-2. 4.2.5.1

Veröffentlicht November 2020

| Stahlzusammensetzung<br>nach DIN EN ISO<br>14713-2, Tabelle 1 | $\epsilon_m$<br>( $\leq 500$ °C) | $\epsilon_m$<br>( $> 500$ °C) |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Kategorie A und B                                             | 0,35                             | 0,7                           |
| Kategorie C und D                                             | 0,7                              | 0,7                           |

## Internationale Normen

Berücksichtigung in der aktuellen Überarbeitung der Eurocode-Normen für Stahl- und Stahlverbundbau

prEN 1993-1-2 & prEN 1994-1-2

Anschließend Überführung in nationale Vorgaben

In Bearbeitung

## MVVTB 2023/1

### Anlage A 1.2.4/9

In Ergänzung zu DIN EN 1993-1-2 und DIN EN 1994-1-2 darf die Emissivität feuerverzinkter Bauteile unter Beachtung der DAST-Richtlinie 027:2020-11 ermittelt werden. In diesem Fall ist sicherzustellen, dass über die gesamte Nutzungsdauer keine zusätzlichen Beschichtungen aufgebracht werden oder oberflächenbeeinflussende Veränderungen vorgenommen werden. Abschnitt 6, Absatz 2 der DAST-Richtlinie 027:2020-11 ist nicht anzuwenden.

# MVV TB

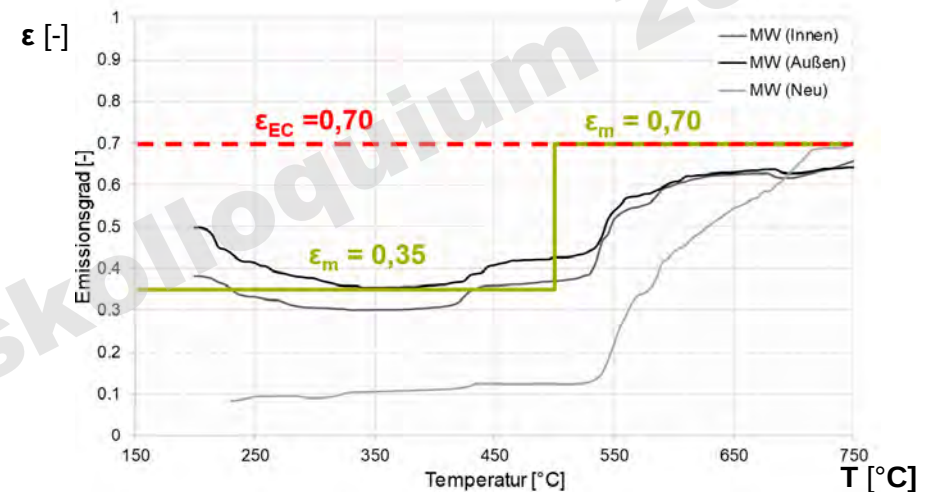
Hinweis auf die Einführung der DAST-Richtlinie 027 in aktueller Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVVTB 2023/1) des DIBt

Einführung in den Bundesländern in Umsetzung, aktueller Stand:

MVV TB 2019/1 – 1 Bundesland

MVV TB 2021/1 – 10 Bundesländer

**MVV TB 2023/1 – 5 Bundesländer**



- Insgesamt sehr schnelle Überführung von Erkenntnissen aus der Forschung in gültige Regelwerke !



## Teil IV Ausgeführte Beispiele aus der Praxis

### R30-Brandschutz durch Feuerverzinken



# Cruise Center Baakenhöft, Hamburg

RWTH AACHEN  
UNIVERSITY

iBM MP  
TU BRAUNSCHWEIG

TUM



# Cruise Center Baakenhöft, Hamburg

- Stahlskelettbauweise mit 1.050 m<sup>2</sup> Grundfläche
- 10 Rahmenelemente mit Stützen aus HEM 240- bzw. HEM 280-Profilen und HEM 280-Trägern, jeweils verbunden durch 4 HEB 200-Profile
- Die feuerverzinkten Stahlprofile decken die brandschutztechnischen Anforderungen für das Cruise Center Baakenhöft (R 30) ohne zusätzliche Kosten ab
- Fertigstellung Mai 2020



# Hubschrauberlandeplatz, Chemnitz

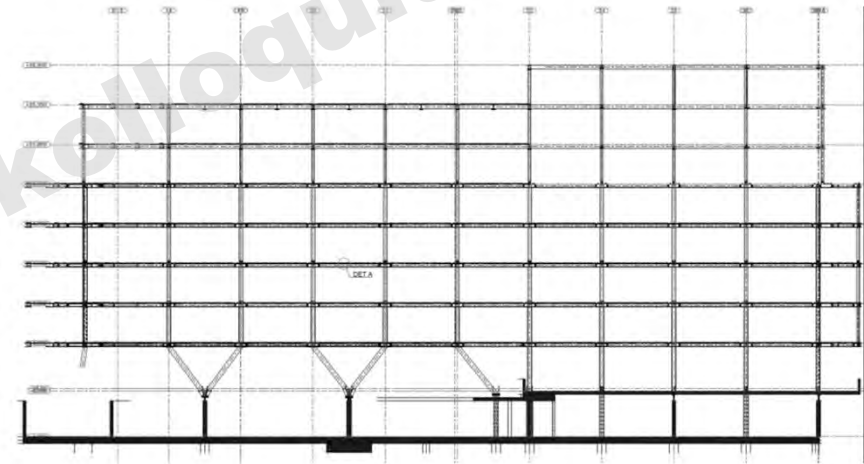
- Nachrüstung eines Hubschrauberlandeplatzes an einem bestehenden Krankenhausgebäude
- Anordnung über einem bestehenden Atrium
- Leichte, werkseitig hergestellte, hochbelastbare und nicht brennbare Konstruktion erforderlich
- Brandschutzberechnungen erfordern eine Feuerbeständigkeit von 30 Minuten (R30) für die Tragkonstruktion
- Stahlkonstruktion des Podestes aus HEA 340- und HEA 450-Profilen
- Feuerverzinkung war günstiger als intumeszierender Anstrich
- Realisiert im Jahr 2021





# Büro- und Geschäftsgebäude (CH)

## Îlot B, “Block B”, Quartier l’Etang - 7 Stockwerke



architects: AAG Atelier d'architecture Grivel & Girod SA, favre & guth sa architectes associés

engineers: Kurmann Cretton Ingénieurs (Design), Ingénieurs-Conseils Scherler SA (Fire protection concept), Mensinger Stadler (Fire Design)



# Büro- und Geschäftsgebäude (CH)

## Îlot B, “Block B”, Quartier l’Etang

- ca. 1700 t Stahl,
- 23.255 m<sup>2</sup>
- R30-Verbundbauweise mit 7 Etagen
- Querschnitte der Hauptträger:
  - HEB300
  - HEM400
  - HEA450
  - HEM260
- Alle Träger als Verbundträger
- Fertigstellung im Jahr 2022



# Rechenzentrum, Düsseldorf

## Aufstockung eines Rechenzentrums mit feuerverzinktem Stahlbau

- 2600 m<sup>2</sup> Dachfläche mit Kühlaggregaten für die Klimatisierung des Rechenzentrums bestückt
- Klimatechnik wurde auf zwei Ebenen installiert, realisiert durch eine komplexe feuerverzinkte Stahlkonstruktion aus Stützen, Trägern und Fachwerkträgern.
- Tragende Stahlbauteile: Geforderte Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten (R30)
- Durchgeführte Heißbemessung: Feuerverzinkte Stahlkonstruktion erfüllt die R30-Anforderungen



# Kältezentrale, Heidelberg



Quelle: Dittmer Fotografie im Auftrag der Stadtwerke Heidelberg



# Kältezentrale, Heidelberg

## Feuerverzinkter Stahlskelett-Neubau in Passivhausstandard

- höchsteffiziente Kältemaschinen und insgesamt fast 500 m<sup>3</sup> Kältespeicher
- Klimaschonender Betrieb dank 130 kW Photovoltaikanlage an der Tragwerkshülle mit 100 % Eigennutzung vor Ort
- 130 Tonnen Stahlskelett-Konstruktion mit R30-Brandschutzanforderung
- Feuerverzinkung liefert den Korrosions- und Brandschutz in einem System
- Fertigstellung 2023



Quelle: Weber Engineering



Vielen Dank an alle Förderer und Unterstützer!  
Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Industriepartner

