

Gaigl Christian, Mensinger Martin

Technischen Universität München, Lehrstuhl für Metallbau

Feuerwiderstand von feuerverzinkten, tragenden Stahlkonstruktionen im Brandfall

Bericht Nr. 169

Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.

Düsseldorf

2019

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Feuerwiderstand von feuerverzinkten, tragenden Stahlkonstruktionen im Brandfall

Einleitung

Ist eine Feuerwiderstandsdauer von mindestens 30 Minuten erforderlich, muss sichergestellt werden, dass das Tragverhalten in der außergewöhnlichen Bemessungssituation eines Brandes den statischen Anforderungen genügt. Stand der Technik, um Stahl- bzw. Stahlverbundkonstruktionen vor zu hohen Bauteiltemperaturen zu schützen, ist ein zusätzlicher passiver Brandschutz. Die Eurocodes bieten in ihren Teilen „-1-2“ aber auch verschiedenste rechnerische Nachweisverfahren, um die Standsicherheit im Brandfall beurteilen zu können. Dabei ist die Temperatur der Stahlbauteile nach DIN EN 1993-1-2 [1] zu bestimmen und der Tragfähigkeitsnachweis, unter Berücksichtigung einer Abminderung der temperaturabhängigen Materialkennwerte, zu führen.

Zu diesem Zweck wurden in dem Forschungsprojekt IGF 18887N „Feuerwiderstand von feuerverzinkten, tragenden Stahlkonstruktionen im Brandfall“ an der Technischen Universität München die Auswirkungen einer Feuerverzinkung auf die Temperaturentwicklung von Stahlbauteilen unter Brandeinwirkung untersucht. Ziel war es eine dauerhafte, kostengünstige *R30*-Brandschutzvariante durch ungeschützte, feuerverzinkte Stahlbauteile zu ermöglichen.

Die Feuerverzinkung ist seit mehreren Jahrzehnten eine wirtschaftliche und effiziente Methode, um Stahl vor Korrosion zu schützen. Neben bekannten Bereichen wie dem Hochbau wird die Feuerverzinkung seit kurzem auch im Bereich des Brückenbaus erfolgreich angewandt. Das Forschungsprojekt zielte darauf ab, zusätzliche Synergie-Effekte im Brandschutz für Bauvorhaben mit einer *R30*-Klassifizierung zu generieren.

Erwärmung von Stahlbauteilen

Zur Beurteilung von innen liegenden Stahlkonstruktionen steht im Allgemeinen die sogenannte Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) als thermische Einwirkung zur Verfügung. Je nach vorliegender Bauordnung können aber auch Naturbrandmodelle verwendet werden. Nach DIN EN 1991-1-2 [1] ist die ETK als thermische Beanspruchung wie folgt definiert:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

mit:

$$T \quad \text{Brandraumtemperatur [}^{\circ}\text{C]} \quad t \quad \text{Zeit [min]}$$

Unabhängig der thermischen Einwirkung erfolgt der Wärmetransport im Brandfall durch Energieaustausch zwischen mehreren Systemen. Dabei wird die thermische Energie immer vom höheren zum niedrigeren Energieniveau transportiert. Haben Bauteile keinen direkten Kontakt, kann dies durch zwei unterschiedliche Mechanismen erfolgen: durch Konvektion und durch elektromagnetische Strahlung. Die Temperaturerhöhung $\Delta\theta_{a,t}$ eines ungeschützten Stahlbauteils lässt sich dabei während eines Zeitintervalls $\Delta t < 5 \text{ [sek]}$ nach folgender Gleichung aus [1] berechnen:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \cdot \Delta t \quad (1)$$

Neben Faktoren, wie dem Korrekturfaktor für Abschattungseffekte k_{sh} , dem Profillfaktor A_m/V sowie der spezifischen Wärmekapazität c_a und der Rohdichte von Stahl ρ_a , findet sich in der Bauteilerwärmung der Nettowärmestrom $\dot{h}_{net}$ wieder. Letzterer setzt sich aus den angesprochenen beiden Teilen der Konvektion $\dot{h}_{net,c}$ sowie der Strahlung $\dot{h}_{net,r}$ zusammen:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (2)$$

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_a) \quad (3)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right] \quad (4)$$

Wie den Formeln zu entnehmen ist, trägt die Wärmestrahlung gerade im Bereich von großen Temperaturdifferenzen zwischen dem Bauteil und der Umgebung, einen deutlich größeren Anteil zur Erwärmung der Bauteile bei. Die Wärmeübertragung aus Strahlung wird dabei maßgeblich durch die Oberfläche der Bauteile beeinflusst, so dass gerade hier ein Effekt aufgrund einer Feuerverzinkung zu erwarten ist. Beide Emissionsgrade, sowohl der Bauteiloberfläche ε_m als des Brandraums ε_f , beeinflussen den Strahlungsanteil des Wärmestroms. Gemäß der Annahme der Annahme $\varepsilon_f = 1,0$ der Eurocodes [1,2] werden dem Emissionsgrad der Umgebung die Eigenschaften eines idealen schwarzen Körpers zugewiesen – einer vereinfachten physikalischen Annahme, die in Realität nicht zutrifft. Für Baustahl wird hingegen, unabhängig dessen tatsächlicher Oberflächenbeschaffenheit, ein Emissionsgrad von $\varepsilon_m = 0,70$ angenommen werden. Dies entspricht einer Wärmeaufnahme von 70 % der eingebrachten Strahlungsenergie. Eine Ausnahme stellt bisher Edelstahl dar, dem ein Emissionsgrad von $\varepsilon_m = 0,40$ zugewiesen wurde.

Feuerverzinkung

Eine Verzinkung erreicht als Korrosionsschutz, in Abhängigkeit der Umgebungsbedingung und deren Schichtdicke meist eine deutlich längere Schutzdauer als 50 Jahre. Ein Wartungs- und

Instandhaltungszwang, den man von anderen Korrosionsschutzsystemen kennt, fällt während dieser Zeit nicht an. Für das Bauwesen besonders wichtig ist das Stück- bzw. Feuerverzinken gemäß DIN EN ISO 1461 [3]. Beim Feuerverzinken bildet sich, als Folge einer wechselseitigen Diffusion des flüssigen Zinkbads mit dem Eisen des Stahlprofils, eine Legierung aus mehreren, verschiedenartig zusammengesetzten Eisen-Zink-Legierungsschichten. In Abhängigkeit mehrerer Faktoren, wie der Zinkbadtemperatur und der Stahlzusammensetzung, sind die in Tabelle 1 aufgelisteten Phasen mehr oder weniger ausgeprägt.

Tabelle 1: Mögliche Phasen einer Feuerverzinkung

	Zusammensetzung	Eisengehalt [%]	Beständigkeitsgrenze [°C]
η-Phase	Zn	0,08	419
ζ-Phase	FeZn ₁₃	6 - 6,2	530
δ_1-Phase	FeZn ₁₀	7 - 11,5	620 - 630
Γ-Phase	Fe ₅ Zn ₂₁	21 - 28	670 - 700
α-Eisen	Fe	100	1536

Einer der wichtigsten Parameter bei der Legierungsbildung ist der Silizium- und Phosphorgehalt des Stahls. Je nach chemischer Zusammensetzung lässt sich dieser gemäß DIN EN ISO 14713-2 [4] in vier Kategorien unterscheiden: Niedrigsilizium-Bereich (Kategorie A), Sebisty-Bereich (Kategorie B), Sandelin-Bereich (Kategorie C) und Hochsilizium-Bereich (Kategorie D). Einen umfassenden Überblick geben hierzu Schulz et al. [5] und Horstmann [6]. Im Bausektor relevant sind ausschließlich die Kategorien A, B und D.

Tabelle 2: Kategorisierung gemäß DIN EN ISO 14713-2 [4]

Kategorie	Bezeichnung	Si- & P- Gehalt des Stahls	Überzugseigenschaft
A	Niedrigsilizium-Bereich	$\leq 0.04\%$ Si <u>und</u> 0.02% P	silber, glänzend, feine Textur
B	Sebisty-Bereich	$> 0.14\%$ bis 0.25% Si	silber, glänzend bis matt
C	Sandelin-Bereich	$> 0.04\%$ bis 0.14% Si	matt, gröbere Textur
D	Hochsilizium-Bereich	$> 0.25\%$ Si	grau, matt, gröbere Textur

Ermittlung des Emissionsgrads von feuerverzinkten Bauteilen

Die Emissivität beziehungsweise der Emissionsgrad ε ist eine dimensionslose physikalische Größe, die ein Maßstab dafür ist, wie stark ein Material bzw. dessen Oberfläche Wärmestrahlung an seine Umgebung abgibt. Den Eurocodes liegt das Kirchhoffsche Gesetz,

das besagt, dass ein guter Strahler auch ein guter Absorber ist und damit die Näherung zu Grunde, dass der Absorptionsgrad α dem Emissionsgrad ε eines Körpers entspricht. Der Emissionsgrad realer Objekte und im Speziellen von metallischen Oberflächen ist von vielen verschiedenen Parametern, wie der Oberflächenbeschaffenheit, der Bauteiltemperatur, dem Wellenlängenbereich oder dem Abstrahlwinkel abhängig und ist folglich eine stark variable physikalische Größe.

Um den temperaturabhängigen Emissionsgrad von verzinkten Stahloberflächen experimentell zu bestimmen, wurde an der Technischen Universität München ein „Emissivity-Performance-Test“-Versuchsstand (siehe Abbildung 1) entwickelt der die Messung in einem Temperaturbereich von 20 – 800 °C ermöglicht. Die Proben (siehe Abbildung 2) wurden dabei durch ein Erhitzungsmodul von der Rückseite kontrolliert erwärmt. Durch den Abgleich der Temperaturmessung von Infrarotsensoren mit den in der Stahlprobe implementierten Thermoelementen, konnte der Emissionsgrad, unter Zuhilfenahme des Planck'schen Strahlungsgesetzes, über den Temperaturverlauf (siehe Abbildung 3) berechnet werden. Der genaue Aufbau des Versuchsstands ist in Gaigl [7] und Mensinger [8] beschrieben.

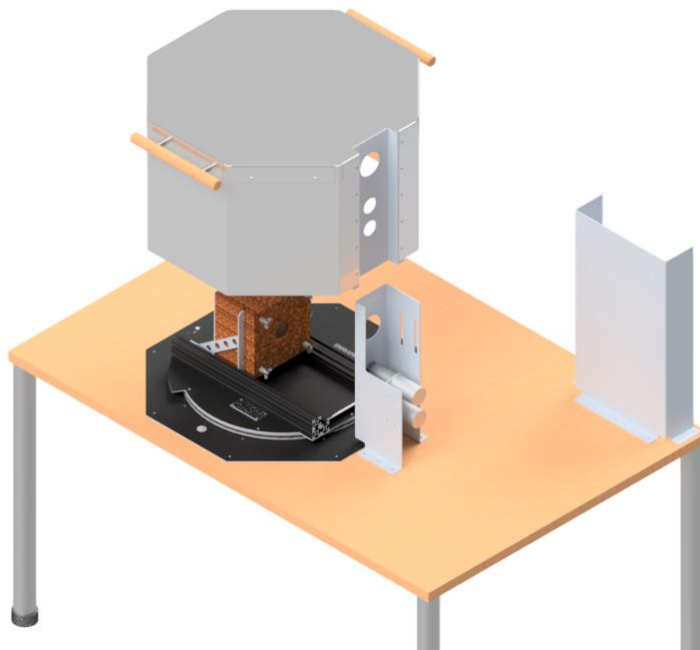


Abbildung 1: Aufbau des Emissivity Performance-Test zur Emissionsgradmessung

Der Emissionsgradanalyse lagen Versuchskörper mit unterschiedlichster Oberflächenbeschaffenheit zu Grunde. Insgesamt wurden dazu über 150 Versuche gefahren und ausgewertet. Neben frisch verzinkten Proben wurden verschiedenste bewitterte Proben mit entsprechender Weißrostbildung getestet. Um zudem einen sehr ungünstigen Zustand zu erreichen wurde allen bewitterten Proben eine achtwöchige, sehr ungünstige Anfangslagerung

zugrunde gelegt. Hierzu wurden sämtliche Regeln bzw. Hinweise des Instituts Feuerverzinken [9] sowie aus Huckshold et al. [10] im Hinblick auf die Lagerung von frisch verzinkten Bauteilen missachtet. Dies hatte eine starke Weißrostbildung zur Folge. Im Nachgang wurden diese Proben unterteilt und zusätzlich für ein Jahr innen bzw. außen gelagert. Die Folgen dieser unterschiedlichen Lagerung auf die Oberflächenbeschaffenheit sind exemplarisch für Proben der Kategorie A in Abbildung 2 zu erkennen. Die optischen Unterschiede spiegeln sich auch in den gemessenen Emissionsgraden wieder.

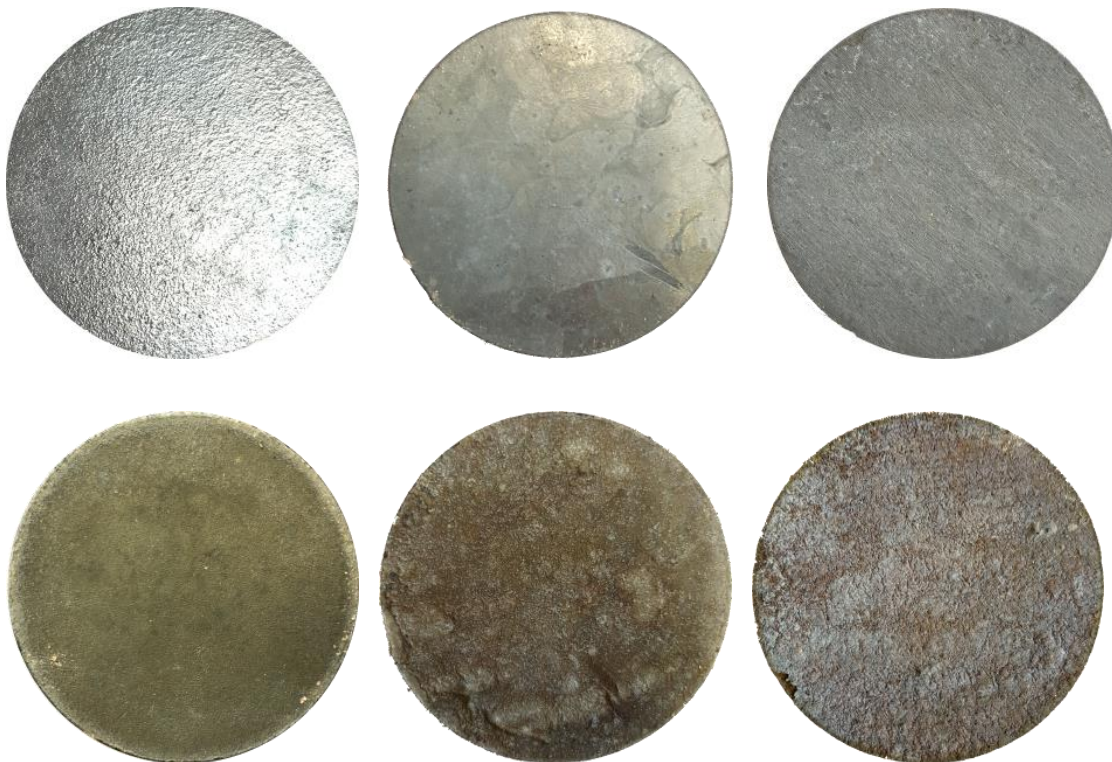


Abbildung 2: Proben vor (1.Reihe) und nach (2.Reihe) der thermischen Einwirkung; von links nach rechts: Kat. A frisch verzinkt, Kat. A bewittert, Kat. D frisch verzinkt

Stellt man die ermittelten Emissionsgrad-Temperatur-Verläufe beispielhaft für feuerverzinkte Proben der Kategorie A dem normativen Emissionsgrad ε_{EC} der DIN EN 1993-1-2 [1] gegenüber, zeigt sich im Hinblick auf eine langsamere Bauteilerwärmung grundsätzlich ein deutlich besseres Verhalten. Während frisch verzinkte Proben „MW (Neu)“, mit ihrer glänzenden Oberfläche, zu Beginn einen sehr kleinen Emissionsgrad aufweisen, beginnt der Emissionsgrad bei den jeweils anfänglich ungünstig gelagerten Proben auf jeweils einem etwas höheren Niveau. Nach Erreichen der ersten Beständigkeitsgrenze der äußeren η -Phase (419 °C) steigt der Emissionsgrad zunächst geringfügig an. Erst nach Überschreiten der zweiten Beständigkeitsgrenze, der ζ -Phase bei ca. 530 °C, erhöht sich die Emissivität deutlich. Proben, welche zu Beginn für acht Wochen sehr ungünstig gelagert wurden und damit einen

Fall abdecken, der in der Realität nicht vorkommen wird, weisen bis in den höheren Temperaturbereich durchgehend größere Emissionsgrade auf. Grund dafür ist der auf der Oberfläche vorhandene Weißrost, der je nach Lagerung stärker oder schwächer ausgeprägt auf der Probenoberfläche vorzufinden war.

Grundsätzlich liegt allen ε - T -Kurven der Kategorie A und B ein deutlich besseres Verhalten zu Grunde als dem, der DIN EN 1993-1-2 [1] entnommenen, konstanten Wert von $\varepsilon_{EC} = 0,70$. Erst gegen Ende, bei höheren Bauteiltemperaturen von ca. 650 – 750 °C, nähern sich die Verläufe dem vorgegebenen Emissionsgrad an oder überschreiten ihn geringfügig.

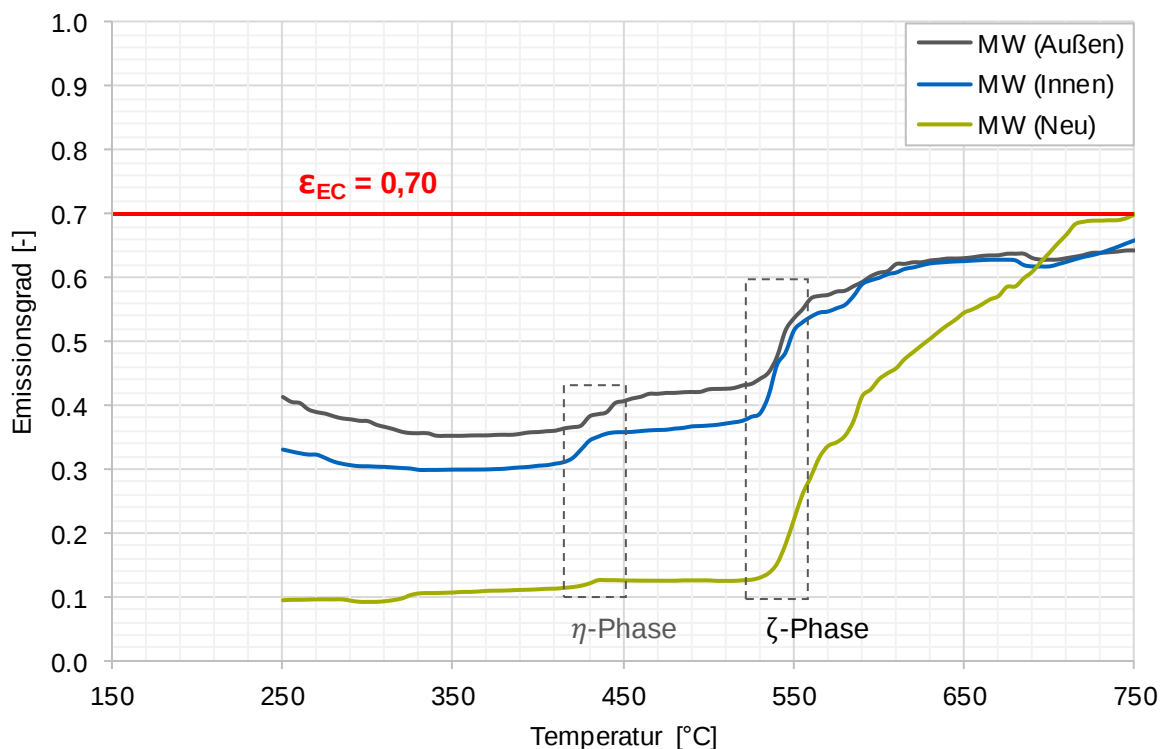


Abbildung 3: Temperaturabhängige Emissionsgrad-Mittelwerte (MW) der Kategorie A für frisch verzinkte Proben („MW (Neu)“), innen gelagerte Proben mit 8-Wochen ungünstiger Anfangslagerung („MW (Innen)“), sowie außen gelagerte Proben mit 8-Wochen ungünstiger Anfangslagerung

Durch weitere Analysemethoden konnte des Weiteren gezeigt werden, dass bei Überschreitung der Beständigkeitsgrenzen der einzelnen Legierungsphasen sich nicht nur der Emissionsgrad ändert, sondern auch die Struktur und chemische Zusammensetzung der Zinkschichten.

Großbrandversuche

Im Zuge des Forschungsvorhabens fanden des Weiteren zwei Großbrandversuche, gemäß DIN EN 1363-1 [11] im Forschungs- und Versuchslabor für Haustechnik der TU München statt. Ziel der Versuche war es die zuvor gewonnenen Erkenntnisse wissenschaftlich im

Brandversuch zu bestätigen. Getestet wurden, wie bereits in den kleinmaßstäblichen Versuchen, feuerverzinkte Probekörper der Kategorien A, B und D mit entsprechend unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften. Zu Vergleichszwecken wurden zudem rostige Proben getestet (siehe Abbildung 4). In den Brandversuchen wurden die Bauteiltemperaturen der einzelnen Probekörper während der 30-minütigen Beanspruchung durch mehrere implementierte Thermoelemente gemessen. Es zeigte sich wiederum ein sehr unterschiedliches Erwärmungsverhalten, in Abhängigkeit der Stahlprobenoberfläche. Während sich frisch verzinkte Proben der Kategorie A deutlich langsamer erwärmten, zeigten rostige Proben das schnellste Erwärmungsverhalten aller getesteten Probekörper. Letzteres entsprach dabei in sehr guter Näherung dem, durch die Eurocodes, vorhergesagten Verhalten mit einem Emissionsgrad von $\varepsilon_m = 0,70$.

Basierend auf der Brandraum- sowie der jeweiligen Bauteiltemperatur aus den Brandversuchen konnten die einzelnen Emissionsgrade der Probekörper näherungsweise zurück gerechnet. Diese bestätigten die zuvor gemessenen Emissionsgrade im Emissivity-Performance-Test.



Abbildung 4: Vergleich der Proben vor (links) und nach (rechts) dem 2. Brandversuch

Emissionsgrad feuerverzinkter Stahlbauteile

Aus den Forschungsergebnissen konnten verschiedenste Einflussfaktoren auf den Emissionsgrad von feuerverzinkten Stahlbauteilen der Kategorien A, B und D ermittelt werden. Zudem wurde ein neues Konzept zur Berücksichtigung der Emissivität von feuerverzinkten Bauteilen der Kategorien A und B im Brandfall entwickelt. Der im relevanten Temperaturbereich variable Emissionsgrad wurde auf der sicheren Seite liegend, in

Anlehnung an die DIN EN 1993-1-2 [1] in ein zweistufiges Konzept umgesetzt. Stahlbauteile der Kategorie D zeigten keinen ausgeprägten positiven Effekt und wurden deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Das zweistufige Emissionsgradkonzept (siehe Tabelle 3) ermöglicht eine einfache Implementierung in die Bemessungsmethoden der Eurocodes DIN EN 1993-1-2 [1] und DIN EN 1994-1-2 [2].

Tabelle 3: Emissionsgradkonzept

	$\varepsilon_m \leq 500^\circ\text{C}$	$\varepsilon_m > 500^\circ\text{C}$
Baustahl	0,70	
Feuerverzinkter Baustahl 1	0,35	0,70

¹⁾ Feuerverzinkter Baustahl gemäß DIN EN ISO 1461 [3] und einer Stahlzusammensetzung gemäß Kategorie A und B nach DIN EN ISO 14713-2 [4]

Der durch den kleineren Emissionsgrad hervorgerufene positive Effekt kann dem Nomogramm (siehe Abbildung 5) entnommen werden. In Abhängigkeit des Profilkfaktors ($k_{sh} \cdot A_m/V$ -Faktor) und des Emissionsgrads kann hier für eine ETK-Brandbeanspruchung die Temperatur des Stahlbauteils für jeweils eine Branddauer von 15 sowie 30 Minuten abgelesen werden: zum einen für Stahlbauteile nach Eurocode (EC) mit einem Emissionsgrad von $\varepsilon_m = 0,70$ und zum anderen für feuerverzinkte (HDG) Stahlbauteile mit einem zweistufigen Emissionsgrad von $\varepsilon_m = 0,35/0,70$.

Der kleinere Emissionsgrad führt gerade bei Profilen mit geringeren Profilkfaktoren und vor allem bei 3-seitig beanspruchten Stahlbauteilen, wie die im Verbundbau der Fall ist, dazu, dass eine R30-Brandschutzanforderung ohne zusätzliche Maßnahmen erreicht werden kann.

Das Konzept wurde bereits im Zuge der Erneuerung der Eurocodes eingearbeitet. Bis zur Einführung ist der Einsatz der neuen Forschungsergebnisse in Deutschland vorläufig nur durch eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) möglich und sollte somit von Anfang an in der Planung berücksichtigt werden.

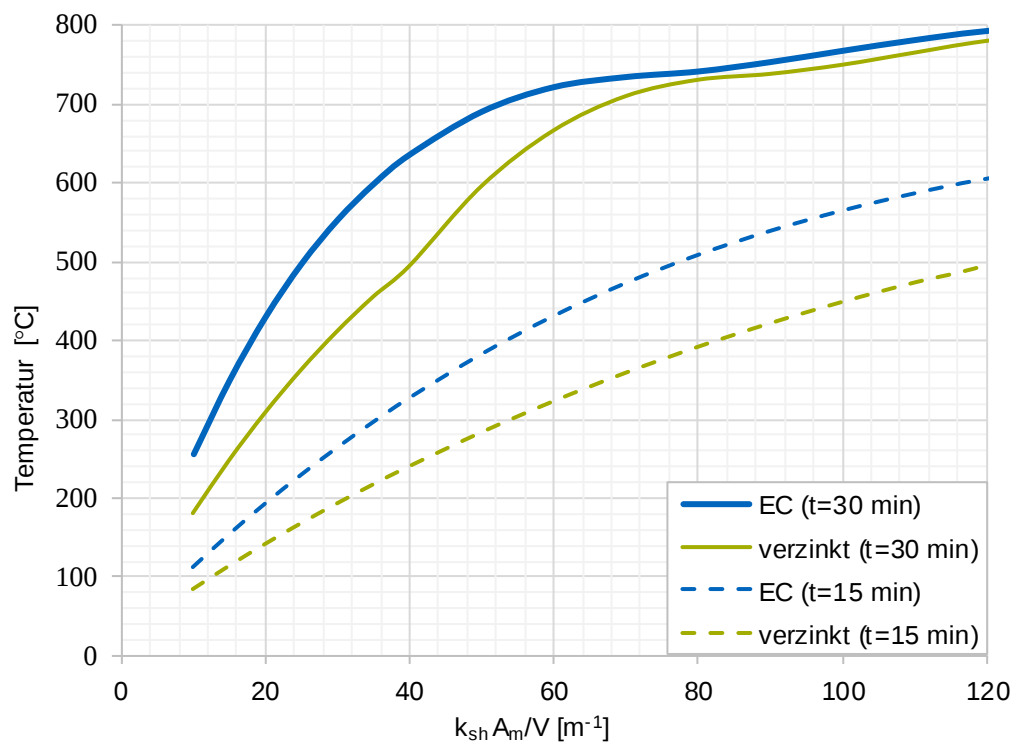


Abbildung 5: Einfluss des Emissionsgrads feuerverzinkter Stahlprofile in Abhängigkeit des $k_{sh} \cdot A_m / V$ -Faktors

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 18887N des GAV (Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.), der FOSTA (Forschungsstelle Stahlanwendungen) und des DAST (Deutscher Ausschuss für Stahlbau) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

Besonderer Dank gilt den beteiligten Industriepartnern, die die Praxisversuche ermöglicht haben.

Literatur

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 1993-1-2:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.*
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 1994-1-2:2010-12, Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.*
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN ISO 1461:2009-10, Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrauchte Zinküberzüge (Stückverzinken) - Anforderungen und Prüfungen.*
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN ISO 14713-2:2009-05, Zinküberzüge – Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion – Teil 2: Feuerverzinken.*
- [5] Schulz, W.-D. and Thiele, M., *Feuerverzinken von Stückgut: Werkstoffe - Technologien - Schichtbildung - Eigenschaften - Fehler*, Leuze, Bad Saulgau, 2012.
- [6] Horstmann, D., *Zum Ablauf der Eisen-Zink-Reaktionen*, 1991.
- [7] Gaigl, C. and Mensinger, M., *Thermal impact on HDG construction*, TU München - Lehrstuhl für Metallbau, 2018.
- [8] Mensinger, M. and Gaigl, C., *Feuerwiderstand verzinkter Stahlkonstruktionen*, vol. 88, pp. 3–10.
- [9] Institut Feuerverzinken, ed., *Arbeitsblätter Feuerverzinken*.
- [10] Huckshold, M. and Thiele, M., *Korrosionsschutz - Feuerverzinken*, Beuth, Berlin, 2011.
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 1363-1:2012-10, Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.*

Autoren des Beitrags



Christian Gaigl, M.Sc. (TUM)
Doktorand am Lehrstuhl für Metallbau der
Technischen Universität München



Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger
Ordinarius des Lehrstuhls für Metallbau der
Technischen Universität München