

Einfluss der Verrußung auf die Emissivität von feuerverzinkten und nicht verzinkten Stahlstützenabschnitten

S. Moschel, V. Thewes, M. Overs, M. Bitter, M. Sommer, J. De Boysere, R. Rohleder, F. J. S. Hauswaldt, M. S. Lauermann

ZUSAMMENFASSUNG Diese Studie untersucht den Einfluss von Verrußung auf die Emissivität von feuerverzinkten und nicht verzinkten Stahlstützenabschnitten unter Brandeinwirkung. Die Brandversuche erfolgten mit der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) an HEB 320 Stahlprofilen jeweils mit und ohne vorangegangene Verrußung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verrußung zu einer signifikant höheren Emissivität führt.

Die Studie unterstreicht die Bedeutung der Berücksichtigung von Verrußungseffekten bei der Berechnung von Stahltemperaturen im Brandfall und liefert wichtige Erkenntnisse für die Anwendung von Bemessungsregeln.

Influence of Soot formation on the Emissivity of Hot-Dip Galvanized and Non-Galvanized Steel Column Sections

ABSTRACT This study examines the influence of soot formation on the emissivity of hot-dip galvanized and non-galvanized steel column sections under fire exposure. The fire tests were conducted according to the Standard temperature/time (STC) on HEB 320 steel profiles, both with and without prior soot formation. The results show that soot formation leads to significantly higher emissivity. The study emphasizes the importance of considering soot formation effects when calculating steel temperatures in fire conditions and provides important insights for applying design rules.

STICHWÖRTER

Stahlbau, Brandschutz, Emissivität, Verzinkung, Verrußung

1 Einführung und Stand der Technik

In der modernen Architektur und im Bauwesen spielen Stahlkonstruktionen eine zentrale Rolle aufgrund ihrer Festigkeit, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit. Da Stahl bei hohen Temperaturen seine Festigkeit verliert ist es jedoch erforderlich ihn mit geeigneten Maßnahmen gegen die Einwirkung hoher Brandtemperaturen zu schützen. Um die Sicherheit von Gebäuden und deren Nutzern im Brandfall zu gewährleisten, ist es unerlässlich, das Verhalten von Stahlbauteilen unter Brandeinwirkung genau zu verstehen und zu bewerten.

Die DIN EN 1993-1-2 (Eurocode 3) [1] geht von einer konstanten Emissivität von $\varepsilon_m = 0,70$ für Kohlenstoffstahl aus. Diese Annahme berücksichtigt jedoch nicht die möglichen Auswirkungen einer Verzinkung auf die Emissivität und damit auf das Erwärmungsverhaltens des verzinkten Stahls.

In anderen Forschungsarbeiten und Normen werden auch andere Emissivitäten genannt. Dazu gehören zum Beispiel die DIN EN 1991-1-2 (Eurocode 1) [2].

Die Untersuchung zum Thema des Einflusses von Zinkbeschichtung auf die Temperatur von Stahlbauteilen im Brandfall von Jirku und Wald [3] zeigten, dass diese die Temperatur von Stahlbauteilen in den ersten 15 Minuten im Brandfall signifikant reduziert. Bei dieser Untersuchung wurde allerdings der Einfluss von Rußbildung im Brandfall nicht betrachtet.

Neuere Untersuchungen von Gaigl [4] deuten darauf hin, dass nach DIN EN ISO 1461 [5] feuerverzinkter Stahl, mit einer Stahlzusammensetzung entsprechend Kategorie A oder B nach DIN EN ISO 14713-2, Tabelle 1 [6], eine deutlich niedrigere

Tabelle 1. Bezeichnungen der Brandprüfungen und Probekörper
Table 1. Designations of fire tests and test specimens

V1r – Prüfung mit vorhergehender Verrußung	V2o – Prüfung ohne Verrußung
PK1rz – verzinkt	PK2zo – verzinkt
PK3sr – blander Kohlenstoffstahl	PK4so – blander Kohlenstoffstahl

Emissivität von $\varepsilon_m = 0,35$ bis zu einer Stahltemperatur von $T = 500^\circ\text{C}$ aufweist. Diese verringerte Emissivität würde zu einer langsameren Erwärmung des Stahls im Brandfall führen und somit die Feuerwiderstandsdauer positiv beeinflussen, insbesondere bei Schutzdauern von bis zu 30 Minuten (R30).

2 Motivation

Die Europäische Norm DIN EN 13381-8 „Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen“ [7] spielt hierbei eine Schlüsselrolle. Sie legt standardisierte Testmethoden fest, um die Wirksamkeit von reaktiven Brandschutzsystemen für verschiedene Bauteile, das heißt Stahlträger und -stützen mit offenen und geschlossenen Profilen, zu beurteilen. Neben den Prüfverfahren nach DIN EN 13381-8 [7] werden zusätzlich noch rechnerische Nachweisverfahren nach Eurocode 3 [1] angewendet. Dieser hat einen Ansatz für die Berechnung der Entwicklung der Stahltemperatur für innen liegende ungeschützte und geschützte Stahlkonstruktionen. Der Ansatz für geschützte Bauteile ist nicht für reaktive Brandschutzsysteme

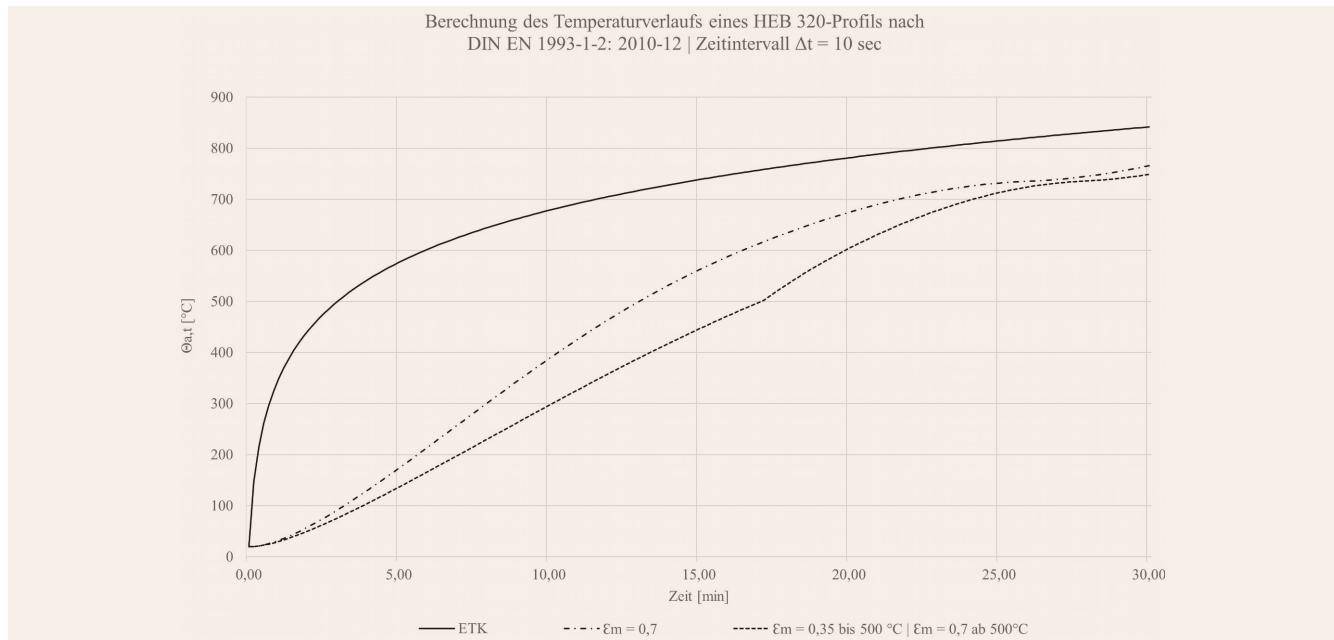


Bild 1. Beispielhafte Berechnung des Temperaturverlaufs eines HEB 320-Profils im Zeitintervall $\Delta t = 10$ Sekunden.

Grafik: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Fig. 1. Example calculation of the temperature profile of an HEB 320 section at time interval $\Delta t = 10$ seconds.

Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

geeignet, da die thermischen Eigenschaften und die Geometrie dieser Systeme sich im Brandfall ändern. Dabei kann für ungeschützte innen liegende Stahlkonstruktionen der Anstieg der Stahltemperatur während des Zeitintervalls Δt mit folgender Formel in einem vereinfachtem Rechenverfahren ermittelt werden:

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

Der Netto-Wärmestrom $h_{net,d}$ ergibt sich aus der Summe der Wärmeübertragungen aus Konvektion ($h_{net,c}$) und Strahlung ($h_{net,r}$), wobei sich letztere nach Eurocode 1 [2] wie folgt berechnen lässt:

$$h_{net,d} = \phi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (2)$$

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind u.a. bereits in den aktuellen Entwurf des Eurocodes 3 [8] eingeflossen (**Bild 1**).

Der Eurocode 3 [1] empfiehlt bei der Temperaturnmessung ein Zeitintervall von 5 Sekunden. Die Aufzeichnung der über die gesamte Prüfdauer gemessenen Temperaturen erfolgte in Zeitintervallen von 10 Sekunden. Eine Berechnung mit $\Delta t = 10$ Sekunden ist daher für genaue Ergebnisse auf Grundlage der Prüfung nahe-liegend. Für die Berechnung mit dem Zeitintervall $\Delta t = 5$ s ergeben sich für eine Beanspruchungsdauer von 30 Minuten keine signifikanten Abweichungen.

Generell wird bei den rechnerischen Nachweisverfahren davon ausgegangen, dass sich die Oberflächen der Bauteile (mit/ohne Feuerverzinkung) in einem idealen Zustand befinden. Verrußungen, wie sie im Rahmen von realen Zellstoffbränden vorkommen, werden ebenso wenig berücksichtigt, wie Schmelzbrandbeanspruchungen nach DIN EN 1363-2 [9] im Vorfeld eines möglichen Vollbrandes.

Nach Siegel [10] absorbiert Ruß Strahlungsenergie in hohem Maße. Als annähernd idealer schwarzer Strahler (Epsilon nahe 1,0) wird von Ruß kaum Energie reflektiert, sodass anzunehmen

ist, dass Rußablagerungen die Wärmeentwicklung am Stahl beeinflussen. Als Folge würde die Temperatur verrußter Stahlstrukturen schneller steigen als bei entsprechend nicht verrußten Bauteilen.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich der Effekt der erhöhten Emissivität verrußter Oberflächen bei Temperaturen größer 600 °C, auf Grund der Verbrennung des Rußes, wieder reduziert wird. Darüber hinaus bildet sich auf unbeschädigten, nicht verzinkten Metallocberflächen bei hohen Temperaturen eine schwarze Oxidschicht, die die Emissivität zusätzlich steigert.

Die Interessengemeinschaft Brandschutzbeschichtungen e.V. (IGSB) hat die Materialprüfanstalt Dresden GmbH (MPA Dresden) mit der Durchführung von Brandversuchen beauftragt, um diese Annahmen zu untersuchen. Die Ingenieurgesellschaft für das Brandverhalten von Bauarten Hauswaldt mbH (IBB Hauswaldt) hat die Brandversuche begleitet und die Ergebnisse der Prüfungen ausgewertet und begutachtet.

Der vorliegende Beitrag untersucht die Temperaturentwicklung unter ETK-Bedingungen gemäß DIN EN 1363-1 [11] verzinkter und nicht verzinkter Stahlstützenabschnitte mit und ohne vorherige Verrußung. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Quantifizierung der rechnerischen Emissivität gelegt.

3 Methodik

3.1 Versuchsaufbau

Für die Prüfungen wurden vier Stahlbauteile des Profiltyps HEB 320 mit einer Länge von 1000 mm verwendet. Die Stahlbauteile gelten entsprechend der Brandprüfnorm DIN EN 13381-8, Absatz 6.2.4 [7] als kurze Stützen oder Träger. Für die Brandversuche erfolgte die Anordnung im Brandraum als Stützen. Für die Brandprüfungen wurde ein identischer Prüfaufbau geplant, so dass alle Probekörper den gleichen Bedingungen ausgesetzt wurden. Auf die aufwendige Installation von Dämmplatten

zum Schutz der Stützenfüße, wie es in der DIN EN 13381-8 [7] gefordert wird, wurde bei diesem Versuchsaufbau verzichtet, da es sich um eine vergleichende Prüfung handelt. Die Ofentemperaturen wurden mit räumlich und symmetrisch angeordneten Thermoelementen ermittelt. Die Ofentemperatur war symmetrisch. Die Abweichungen der Einwirkungen (Integral der gemessenen Temperatur) zwischen linker und rechter Ofenhälfte betrug bei einer Brandprüfung weniger als ein Promille, bei der zweiten Brandprüfung mit Ruß circa ein Prozent.

Zwei der Stahlbauteile wurden in Vorbereitung auf die Prüfung nach der DAST-Richtlinie 022 [12] in Verbindung mit DAST-Richtlinie 027 [13] feuerverzinkt. Die zwei anderen Stahlbauteile wurden mit dem Oberflächenvorbereitungsgrad Sa 2,5 (nach ISO 25178 [14]) gesandstrahlt.

Die Prüfung V2o (**Tabelle 1**) wurde zur Bestätigung der Emissivitäten aus dem Eurocode 3 [1] durchgeführt und dient als Kontrollversuch der hier angewendeten Methodik.

Der Temperaturverlauf auf den Stahloberflächen wurde mit normkonformen Thermoelementen (Typ K, Hersteller: KIWA MPA Dresden GmbH) entsprechend der Norm DIN EN 60584-1 [15] dokumentiert und nach den Vorgaben von DIN EN 13381-8 [7] angebracht. Um eine homogene Temperaturmessung zu gewährleisten, wurden über die Mindestanforderungen der DIN EN 13381-8 [7] hinaus zwei zusätzliche Thermoelemente in der Position 2 (**Bild 2**) angebracht.

Die Brandprüfungen wurden im Wandofen (Prüfstand Nr. OW02-00) der MPA Dresden mit einem Öffnungsmaß von 3,0 m x 3,0 m und einer Tiefe von 1,5 m durchgeführt. Der Ofen verfügt über 6 Öl brenner. Der Prüfaufbau war für beide Brandprüfungen identisch. Es wurden jeweils ein verzinktes und ein nicht verzinktes Bauteil nebeneinander und mittig im Brandraum im Abstand von 1,3 m zu den seitlichen Brennern angeordnet, sodass eine gleichmäßige thermische Beanspruchung für beide Stützen erfolgte. Der Abstand zwischen den Probekörpern betrug 0,7 m. Diese Anordnung ließ eine 4-seitige Beflam mung beider Stützen im Brandraum zu. Je drei Brandraumthermoelemente wurde auf beiden Seiten in unterschiedlicher Höhe symmetrisch angebracht.

Für die Prüfung VR1r mit vorhergehender, vollständiger Ver rußung wurde zusätzlich eine Brandwanne mit 1 L Kerosin und 0,786 g Sägemehl (Späne von unbehandeltem Hartholz aus Buche und Eiche von der Tischlerei Ulrich Herms in Berlin) auf dem Boden des Brandofens mit einem Abstand von 0,4 m vor den Probekörpern platziert (**Bild 3** und **Bild 4**). Die Mischung aus Kerosin und Sägemehl wurde in Vorversuchen ermittelt und so gewählt, dass eine reproduzierbare homogene Belegung der Prüfkörper mit Ruß gewährleistet war. Weiterhin wurde auf Grundlage der Vorversuche festgestellt, dass sich die Anordnung der Stahlbauteile auf einem 1 m hohen Sockel positiv auf eine gleichmäßige Verrußung der Bauteile auswirkt.

Für die Prüfungen mit vorhergehender Verrußung wurden die Materialien in der Brandwanne entzündet. Diese brannten für circa 18 Minuten, bis es zum Erlöschen der Flamme kam. Im An schluss wurde der Ofen geöffnet und der Zustand der Probekörper visuell dokumentiert (**Bild 5**).

3.2 Berechnung der Emissivität

Unter Berücksichtigung der Formeln in Abschnitt 1 und den Angaben aus dem Eurocode 3 [1] wurden aus den gemessenen

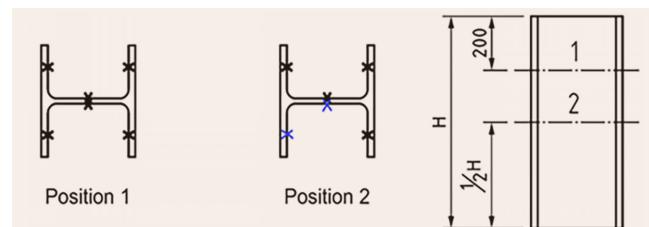


Bild 2. Anordnung Thermoelemente nach DIN EN 13381-8 [7] mit zusätzlich vorgesehenen Thermoelementen (blau).

Grafik: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Fig. 2. Arrangement of thermocouples according to DIN EN 13381-8 [7] with additional planned thermocouples (blue).

Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

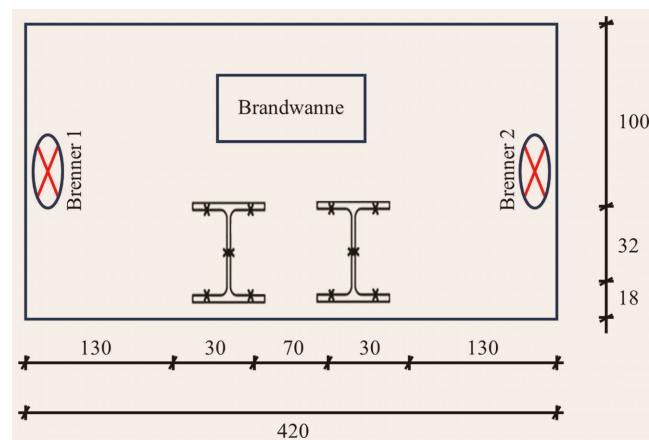


Bild 3. Schematische Anordnung im Brandraumgrundriss (nicht maßstabsgetreu), Angaben in cm.

Grafik: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Fig. 3. Schematic arrangement in the fire chamber (not true to scale), dimensions in cm.

Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)



Bild 4. Probekörper vor den Prüfungen.

Foto: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Fig. 4. Test specimens before testing.

Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Temperaturdifferenzen im Zeitintervall Δt die jeweiligen Emissivitäten berechnet. Die Berechnungen wurden auf diese Weise für HEB 320 Profile unter ETK-Brandbeanspruchung und für eine 4-seitige Beflam mung vorgenommen. In die Gleichung für den Temperaturanstieg nach Eurocode 3 [1] gehen als baustoffspezifische Faktoren (siehe Eurocode 1 [2] und Eurocode 3 [1]) die



Bild 5. Bauteile nach Verrußung.

Foto: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)
Fig. 5. Test specimens after sooting.
Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Rohdichte des Stahls mit $\varrho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ sowie die spezifische Wärmekapazität des Stahls c_a in Abhängigkeit der Stahltemperatur Θ_a ein. Folgt man den Regeln des Eurocode 3 [1] so müssen für die Temperaturbereiche $20^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}$, $600^\circ\text{C} - 735^\circ\text{C}$, $735^\circ\text{C} - 900^\circ\text{C}$ und $900^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$ unterschiedliche Wärmekapazitäten für die Berechnung herangezogen werden. Bei unseren Untersuchungen wurden nur die ersten beiden Bereiche, inklusive der unterschiedlichen Wärmekapazitäten, betrachtet. Weiterhin fließt der bauteilspezifische Faktor für den Abschattungseffekt in die Berechnung ein. Dieser wird mittels des dimensionslosen Korrekturfaktors k_{sh} berücksichtigt. Für offene Querschnitte mit einer profilfolgenden Beschichtung wurde ein k_{sh} von 0,9 zu Grunde gelegt. Bei I-Querschnitten unter nominaler Brandeinwirkung darf der Abschattungseffekt nach Eurocode 3 [1] mit $k_{sh} = 0,9^* ([\text{Am}/\text{V}]_b)/[\text{Am}/\text{V}]$ bestimmt werden. Dies ist zwar kei-

ne konservative Annahme, aber eine übliche. Im vorliegenden Fall ergibt sich $k_{sh} = 0,9^* 1,0$.

Bei einer solchen üblichen Bemessung mit $k_{sh} = 0,9$ und unter Berücksichtigung der hier im Folgenden ermittelten Emissivitätswerten würden also exakt die gemessenen Stahltemperaturen berechnet.

Die Profilfaktoren können dem aktuellen Regelwerk entnommen werden. Der Einfluss der Brandbeanspruchung in Form der ETK nach DIN EN 1363-1 [11] wird bei Ansatz des Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_c = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für die Konvektion der Oberfläche berücksichtigt. Der Konfigurationsfaktor φ wird mit 1,0 angegeben, sofern keine spezifischen Angaben anderweitig vorliegen. Die Stephan-Boltzmann-Konstante geht mit $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K}^4)$ ein. Die Emissivität der Flamme beziehungsweise des Brandraumes wird für die Berechnung vereinfacht mit $\varepsilon_f = 1$ angenommen.

Für diese Versuchsreihe wurde die Rückrechnung der Emissivität auf Basis experimenteller Daten (Stahltemperatur) durchgeführt, während der Eurocode 3 [1] von vereinfachten Annahmen ausgeht. Zudem ist die Annahme, dass sich die Bedingungen für die Wärmeübertragung durch Luft (Konvektion) bei steigender Temperatur nicht ändern, eine weitere Vereinfachung.

4 Ergebnisse der Brandprüfungen

4.1 Verrußung

Die visuelle Begutachtung der Bauteile zeigt eine gleichmäßig verteilte Rußschicht auf beiden Bauteilen (Bild 5).

4.2 Temperaturmessungen

Zur Gegenüberstellung der Bauteiltemperaturen wurden die an den einzelnen Messstellen dokumentierten Temperaturwerte pro Probekörper ($\Delta t = 10 \text{ s}$) gemittelt. In der Prüfung mit vorhergehender Verrußung kam es am Probekörper PK3sr (sandgestrahltes Bauteil ohne Verzinkung) zum Versagen einer Messstel-

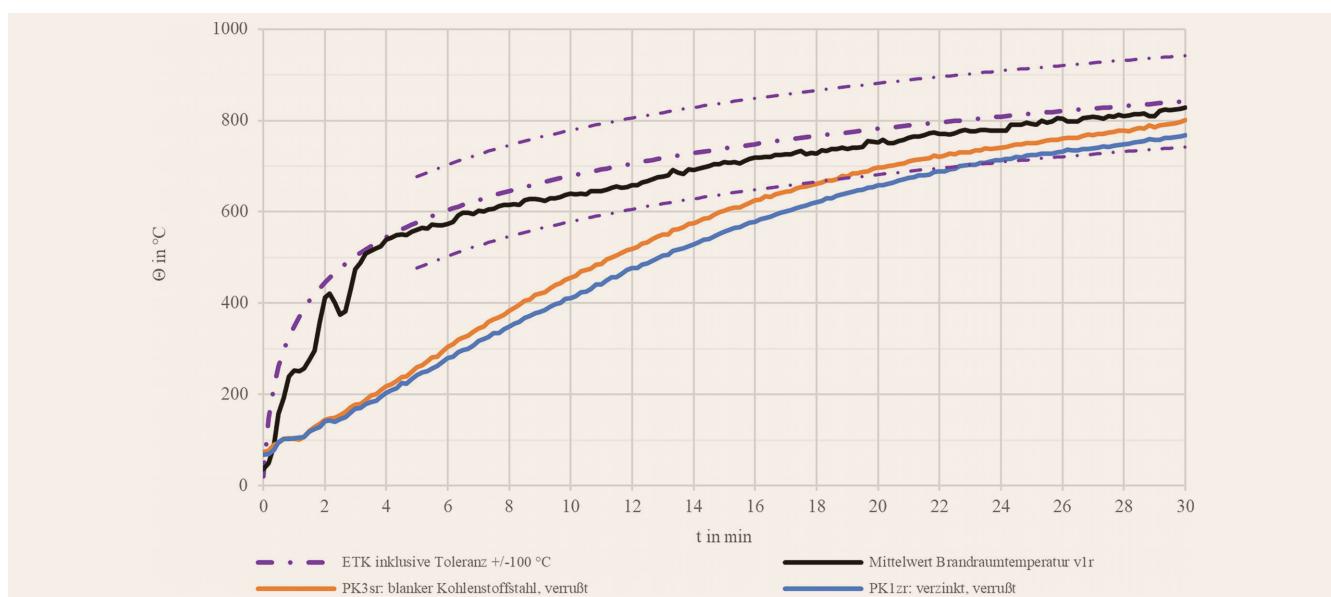


Bild 6. Temperaturverlauf der verrußten Probekörper PK1zr und PK3sr unter Beanspruchung nach ETK.

Grafik: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Fig. 6. Temperature profile of the sooted test specimens PK1zr and PK3sr under exposure to the STC.

Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

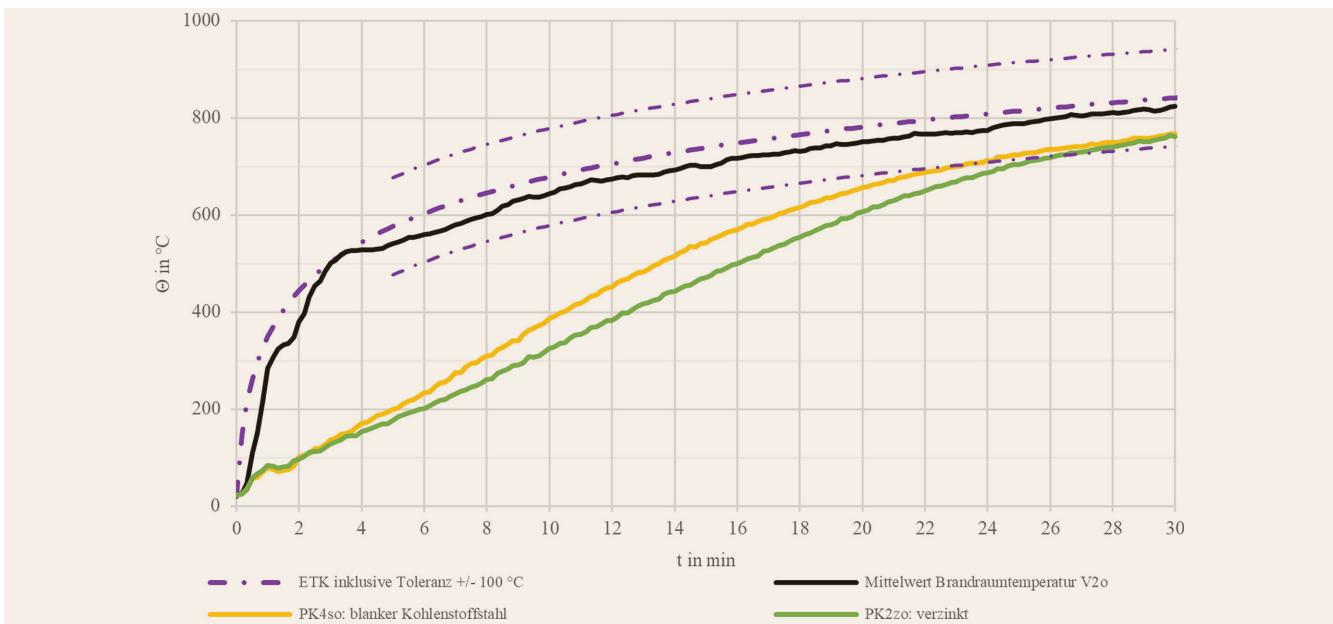


Bild 7. Temperaturverlauf der Probekörper PK2zo und PK4so unter Beanspruchung nach ETK.

Grafik: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Fig. 7. Temperature profile of the sooted test specimens PK2zo and PK4so under exposure to the STC.

Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Tabelle 2. Gegenüberstellung der nach Eurocode 3 [1] berechneten und in der Brandprüfung gemessen Dauer in Minuten bis zum Erreichen einer Stahltemperatur von 500°C mit Verrußung

Table 2. Comparison of calculated and measured duration in minutes according to Eurocode 3 [1] until reaching a steel temperature of 500°C with sooting

Minuten berechnet bis 500°C $\varepsilon_m=0,35$ ab 500°C $\varepsilon_m=0,7$	Minuten gemessen PK1zr	Abweichung in Minuten	Minuten berechnet $\varepsilon_m=0,7$	Minuten gemessen PK3sr	Abweichung in Minuten
16,7	12,8	3,9 (30 %)	12,7	11,3	1,4 (12 %)

le. Die gemessenen Werte dieses Thermoelements wurden nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Prüfung V1r, bei der die Probekörper vor dem Test verrußt wurden, sind in **Bild 6** grafisch dargestellt. Die Analyse zeigt einen deutlichen Temperaturunterschied zwischen dem unverzinkten Kohlenstoffstahl (PK3sr, orange Linie) und dem verzinkten Probekörper (PK1zr, blaue Linie). Wie im Bild 6 zu erkennen ist, haben die Probekörper PK3sr (orange Linie) und PK1zr (blaue Linie) im Vergleich zum Brandraum (schwarze Linie) eine höhere Starttemperatur. Dieser Umstand lässt sich mit dem vorangegangenen Verrußungsprozess und der anschließenden Begutachtung der Bauteile erklären. Durch das Öffnen des Ofens kühlte der Brandraum deutlich schneller ab als die darin befindlichen Stützen.

Der unverzinkte Stahl wies durchgehend höhere Temperaturen auf. In den ersten 9 Minuten vergrößerte sich die Temperaturdifferenz stetig und erreichte über 40 K. Der Probekörper PK3sr erreichte eine Stahltemperatur von 500°C nach 11,3 Minuten, während der verzinkte PK1zr diese Temperatur erst nach 12,8 Minuten erreichte.

Die maximale Temperaturdifferenz von 50 K wurde nach 14 Minuten bei einer Brandraumtemperatur von etwa 700°C ge-

messen. Danach verringerte sich der Temperaturunterschied leicht. Der unverzinkte Probekörper PK3sr erreichte 700°C nach 20,3 Minuten, der verzinkte PK1zr folgte in der 23. Minute.

Am Ende der 30-minütigen Prüfung betrug die Temperatur des unverzinkten Probekörpers PK3sr 800°C, während der verzinkte Probekörper PK1zr etwa 30°C kühler blieb.

Die Kontrollprüfung V2o, durchgeführt ohne vorherige Verrußung der Probekörper, zeigte ebenfalls signifikante Temperaturunterschiede zwischen dem unverzinkten Kohlenstoffstahl (PK4so, gelbe Linie) und dem verzinkten Probekörper (PK2zo, grüne Linie), wie in **Bild 7** dargestellt.

Der unverzinkte Stahl erwärmte sich durchgehend schneller. In den ersten 12 Minuten vergrößerte sich die Temperaturdifferenz zwischen den Probekörpern kontinuierlich. Zu diesem Zeitpunkt wies der Probekörper PK4so eine Temperatur von 425 °C auf, was einer Differenz von etwa 70 K zum verzinkten PK2zo entsprach.

Ab der 18. Minute, bei einer Temperatur von circa 600°C am PK4so (725 °C im Brandraum), begann die Temperaturdifferenz langsam abzunehmen. Der unverzinkte Probekörper PK4so erreichte eine Stahltemperatur von 700°C nach 23 Minuten, während der verzinkte PK2zo diese Temperatur erst in der 25. Minute (785 °C im Brandraum) erreichte.

Tabelle 3. Gegenüberstellung der nach Eurocode 3 [1] berechneten und in der Brandprüfung gemessen Dauer in Minuten bis zum Erreichen einer Stahltemperatur von 500 °C ohne Verrußung

Table 3. Comparison of calculated and measured duration in minutes according to Eurocode 3 [1] until reaching a steel temperature of 500 °C without sooting

Minuten berechnet bis 500 °C $\varepsilon_m = 0,35$ ab 500 °C $\varepsilon_m = 0,7$	Minuten gemessen PK2zo	Abweichung in Minuten	Minuten berechnet $\varepsilon_m = 0,7$	Minuten gemessen PK4so	Abweichung in Minuten
17,2	16,0	1,2 (8 %)	13,1	13,5	0,4 (-3 %)

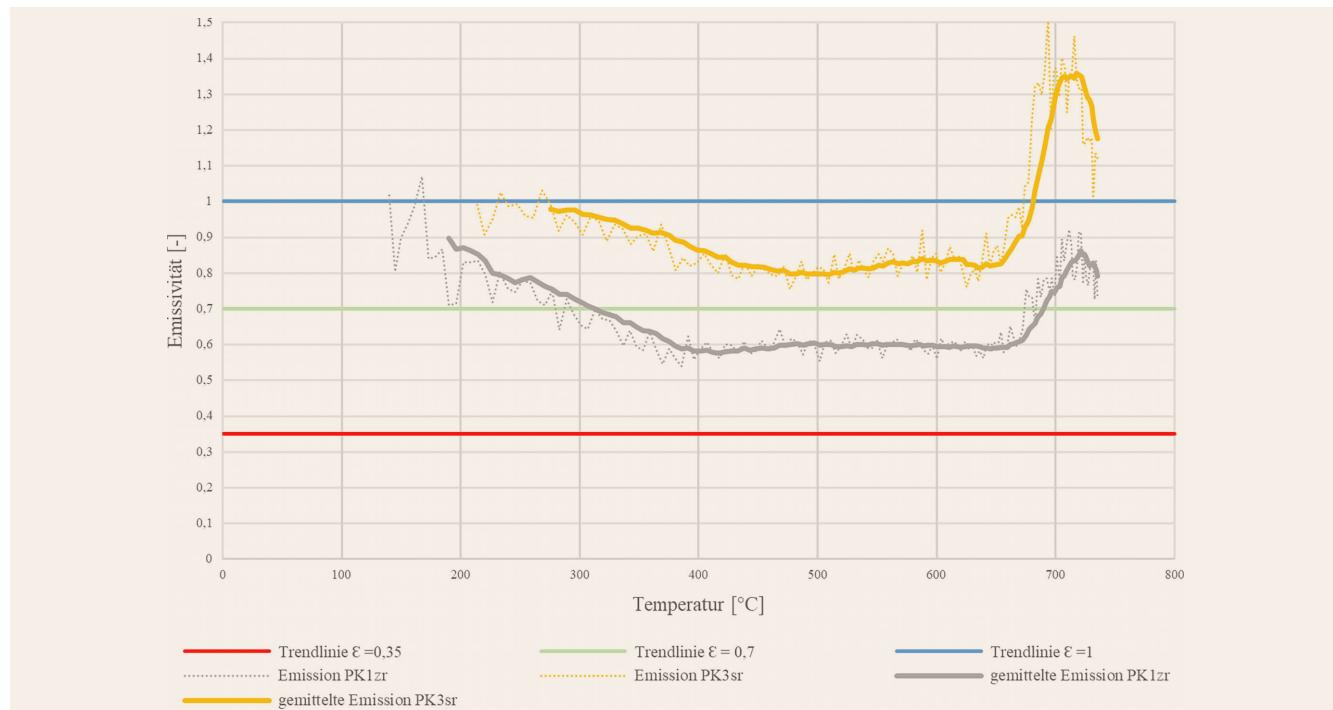


Bild 8. Emissivitäten bei Verrußung der Bauteile. Grafik: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Fig. 8. Emissivity for sooted test specimen. Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)

Nach Ablauf der 30-minütigen Prüfung betrug die Temperatur des verzinkten Probekörpers PK2zo 761 °C, während der unverzinkte PK4so mit 767 °C nur geringfügig wärmer war.

Die Abweichungen der ETK lagen für beide Prüfungen über den gesamten Zeitraum im Bereich der zulässigen Abweichung. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die thermische Beanspruchung der Probekörper gleichwertig war und ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich ist.

5 Diskussion

5.1 Gegenüberstellung der Temperaturen

Aus den in Abschnitt 3.2 ermittelten Temperaturdaten wurden die nachfolgende **Tabelle 2** (Bezug nehmend auf **Bild 6**) und **Tabelle 3** (Bezug nehmend auf **Bild 7**) erstellt. Darin wird ausgewertet nach welcher Beanspruchungsdauer in Minuten eine Stahltemperatur von $T = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ berechnet beziehungsweise an den Probekörpern gemessen wurden. Die Bewertung dieser Tabellen erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 5.2.

Als Starttemperatur der Berechnung wurden die an den Probekörpern gemessenen Stahltemperaturen zu Beginn der Brandprüfung angesetzt. Negative Abweichungen liegen auf der sicheren Seite da der berechnete Wert schlechter ist als der gemessene

Wert. Wie im Stand der Technik üblich wurde als Grundlage die normative ETK und vereinfachte Annahmen für die Konvektion verwendet. Da es sich um eine vergleichende Prüfung handelt, wurden für alle Probekörper die gleichen Vereinfachungen vorgenommen.

5.2 Emissivitäten

In den nachfolgenden Abbildungen sind die auf Basis der Brandprüfungen ermittelten Emissivitäten der einzelnen Probekörper dargestellt (**Bild 8** und **Bild 9**). Die Berechnung erfolgte anhand der gemessenen Temperaturen für ein Zeitintervall $\Delta t = 10$ Sekunden. Dieser Zeitschritt wurde abweichend von der Empfehlung des Eurocodes 3 [1] gewählt, um die Messwerte der Versuche, die in Zeitintervallen von 10 Sekunden aufgenommen wurden, genau abzubilden. Die Emissivität ε_m ist ein Maß dafür, wie effizient eine Oberfläche Strahlungsenergie im Vergleich zu einem idealen schwarzen Körper abgibt. Diese kann nur Werte von $0 < \varepsilon_m < 1,0$ annehmen. Berechnete Emissivitäten $\varepsilon_m \geq 1,0$ sind physikalisch nicht möglich. Sie deuten darauf hin, dass Effekte, die zur Erwärmung der Stahlstützenabschnitte beitragen nicht berücksichtigt werden. Bei niedrigen Stahltemperaturen ist der konvektive Anteil wesentlich für die Erwärmung der Probekörper

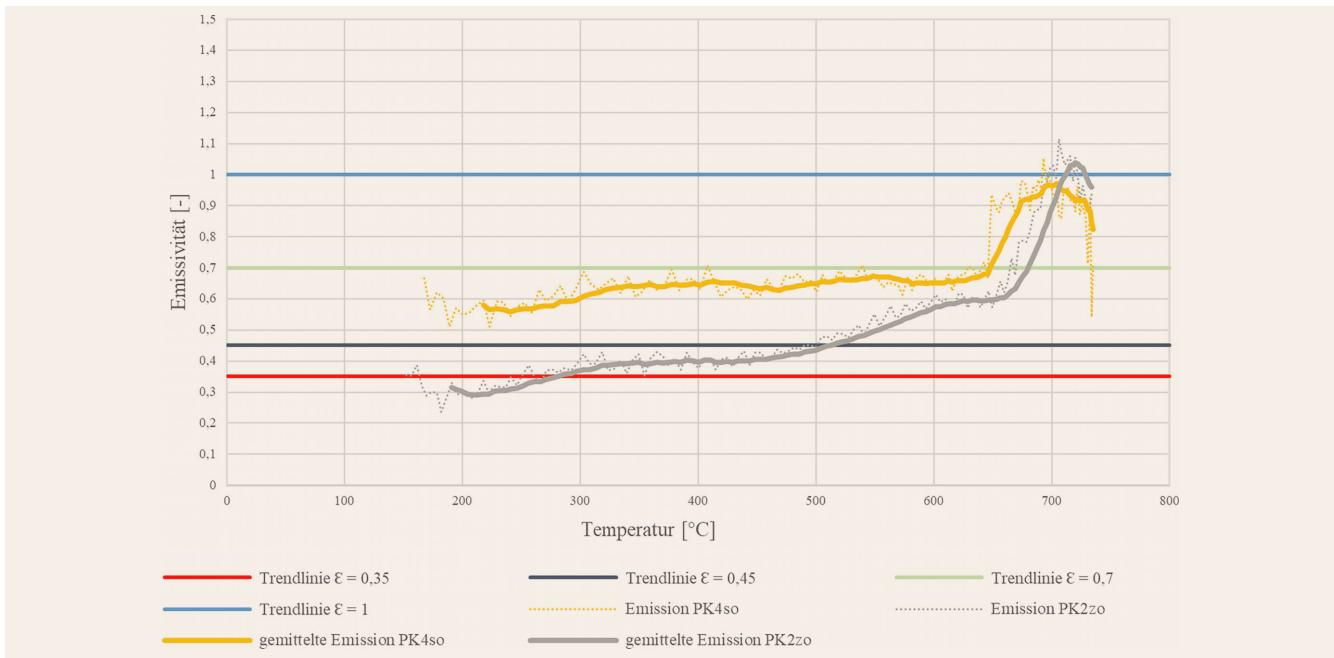


Bild 9. Emissivitäten ohne Verrußung der Bauteile. *Grafik: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)*
Fig. 9. Emissivity without soot of test specimens. *Source: Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e.V. (IGSB e.V.)*

verantwortlich. Die Bewertung des konvektiven Anteils bei niedrigen Temperaturen ist nicht Bestandteil dieser Studie. Bei hohen Stahltemperaturen wird zum Beispiel die einsetzende Verbrennung des Rußes (ab circa 600 °C) bei der rechnerischen Bewertung der Emissivität auf Basis der gewonnenen Temperaturdaten nicht berücksichtigt. Fast alle Parameter wie Stahldichte oder konvektiver Wärmeübergangskoeffizient werden als gegeben und temperaturkonstant angenommen. Nur durch die Anpassung der rechnerischen Emissivitätswerte müssen also alle Effekte abgebildet werden, die zur Erwärmung der Probekörper führen. Wenn aber auch andere Effekte wie beispielsweise die Verbrennung des Rußes bei Rußtemperaturen über 600 °C zu einer zusätzlichen Erwärmung führen, so sind die berechnete Emissivitätswerte bei diesen Stahltemperaturen rechnerisch zu hoch und erreichen daher Werte über 1,0.

Die Berechnung der Stahltemperatur des verrosten Stützenabschnitts HEB 320 aus Kohlenstoffstahl ohne Verzinkung unter Annahme von Emissivitäten von $\varepsilon_m = 0,7$ bis 500 °C wich 12 % von der Prüfdauer (**Tabelle 2**) bis zum Erreichen von 500 °C Stahltemperatur ab. Mit einer rechnerischen Emissivität von $\varepsilon_m = 0,7$ werden die realen Stahltemperaturen des verrosten Stützenabschnitts bis zum Erreichen von 500 °C also unterschätzt. Eine rechnerische Emissivität von $\varepsilon_m = 0,9$ führt zu sicheren Ergebnissen. Die Berechnung der Stahltemperatur des verrosten Stützenabschnitts HEB 320 aus feuerverzinktem Stahl unter Annahme einer Emissivität von $\varepsilon_m = 0,35$ bis 500 °C wich 30 % von der Prüfdauer (**Tabelle 2**) bis zum Erreichen der Stahltemperatur von 500 °C ab. Mit einer rechnerischen Emissivität von $\varepsilon_m = 0,35$ werden die realen Stahltemperaturen des verrosten feuerverzinkten Stützenabschnittes bis zum Erreichen von 500 °C also deutlich unterschätzt. Eine rechnerische Emissivität von $\varepsilon_m = 0,75$ führt zu sicheren Ergebnissen. Der Anstieg der Emissivitätswerte ab 650 °C lässt sich unter anderem wie in Abschnitt 5.2 beschrieben mit der Verwendung von als konstant angenommenen Parametern in der Berechnungsformel erklären.

Mit den Bemessungsregeln der Eurocode 3 [1] wurden die Stahltemperaturen der Stützenabschnitte HEB 320 aus Kohlenstoffstahl ohne Verzinkung in guter Näherung zu den experimentellen Messwerten berechnet. Auf Grundlage dessen wurde bestätigt, dass eine rechnerische Emissivität von $\varepsilon_m = 0,7$ für sandgestrahlten Kohlenstoffstahl zu sicheren Erwärmungsberechnungen führt.

Die Berechnung der Stahltemperatur des verzinkten HEB 320 unter Annahme einer Emissivität von $\varepsilon_m = 0,35$ bis 500 °C wich 8 % (**Tabelle 3**) von der Prüfdauer bis zum Erreichen von 500 °C Stahltemperatur ab. Mit einer rechnerischen Emissivität von $\varepsilon_m = 0,35$ für verzinkten Kohlenstoffstahl ohne Ruß werden die realen Stahltemperaturen des verzinkten Stützenabschnittes bis zum Erreichen von 500 °C also leicht unterschätzt. Eine rechnerische Emissivität von $\varepsilon_m = 0,45$ führt zu sicheren Ergebnissen.

5.3 Ausblick

Ob die Ergebnisse aus dieser experimentellen Studie auf andere Profilfaktoren beziehungsweise Profiltypen übertragen werden können, erfordert weitergehende Untersuchungen. Zusätzliche Untersuchungen sind notwendig, um den Einfluss einer nur teilweisen Verrußung der Bauteiloberflächen auf die Emissivität bewerten zu können.

6 Schluss

Für die Berechnungen der Temperatur von Stahlbauteilen nach Eurocode 3 [1] ist es notwendig, dass die zu Grunde liegenden Faktoren – in diesem Fall die Emissivität der Bauteiloberflächen – immer zu Ergebnissen führen, die auf der sicheren Seite liegen, so dass die berechneten Temperaturen die realen Temperaturen der Stahlbauteile nicht unterschreiten. Um Ergebnisse auf der sicheren Seite liegend zu erhalten, wurde in dieser Untersuchung eine vollständige Verrußung der Bauteiloberflächen angestrebt.

Anhand von vergleichenden Brandprüfungen von feuerverzinkten und nicht verzinkten Stahlstützenabschnitten des Typs HEB 320 konnte gezeigt werden, dass die Verrußung der Bauteilloberflächen zu einer signifikanten Erhöhung der Emissivität führt. Für Bauteile, die nach DASt-Richtlinie 022 [12] und DASt-Richtlinie 027 [13] feuerverzinkt wurden, muss für einen Temperaturbereich von 350 – 600 °C bei vollständiger Verrußung eine Emissivität von $E_m = 0,70$ angenommen werden, um bei Berechnungen nach Eurocode 3 [1] auf der sicheren Seite liegende Werte zu erhalten. Für Bauteile aus nicht verzinktem Kohlenstoffstahl muss für einen Temperaturbereich von 350 – 600 °C bei vollständiger Verrußung eine Emissivität von $E_m = 0,95$ angenommen werden, um bei entsprechenden Berechnungen Werte zu erhalten, die auf der sicheren Seite liegen.

Der berechnete Fehler (Tabelle 2) wirkt sich bei 0,95 anstatt 0,7 jedoch nicht so stark aus wie bei 0,75 anstatt 0,35.

Mit einer zusätzlichen Brandprüfung, bei der keine Verrußung durchgeführt wurde, konnte die Prüfmethodik überprüft und verifiziert werden. Für den unverzinkten Kohlenstoffstahl wurde bestätigt, dass eine angenommene Emissivität von $E_m = 0,70$ zu sicheren Ergebnissen führt. Hingegen führt die, im Entwurf der neuen Version des Eurocodes [8], anzunehmende Emissivität von $E_m = 0,35$ für verzinkten Stahl bis zu Stahltemperaturen $T \leq 500$ °C, zu Ergebnissen, die ein wenig auf der unsicheren Seite liegen. Diese Emissivität von 0,35 basiert auf den Untersuchungen von Gaigl [4].

Für die Festsetzung von Emissivitäten von Bauteilloberflächen zur Anwendung von Rechenverfahren im Eurocode 3 [1] erscheint die Berücksichtigung einer Verrußung hingegen richtig und wichtig, insbesondere wenn die sich zu verwendenden Emissivitäten sehr niedrig ist, während der sich einstellende Fehler bei höheren Emissivitäten (**Tabelle 3**) zwischen 0,7 und 1,0, mit 12 %, nicht sehr groß ist.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse dieser Studie keinesfalls mit einer Forderung verknüpft sind, dass zukünftig immer eine Verrußung vor der eigentlichen Brandprüfung durchzuführen sei. Zum einem fordern viele Zulassungsverfahren von Brandschutzprodukten bereits den separaten Nachweis einer Schmelzbrandprüfung, bei der es zur Verrußung kommt. Zum anderen wirkt sich eine Rußbildung auch generell nicht negativ aus, da bei vielen Systemen – wie zum Beispiel bei reaktiven Brandschutzsystemen – die Bildung von temperaturisolierenden schwarzen Kohlenstoffschichten beabsichtigt ist.

DANKSAGUNG

Die Interessengemeinschaft Brandschutzbeschichtung e.V. dankt der Materialprüfanstalt Dresden GmbH sowie dem Team der Ingenieurgesellschaft für das Brandverhalten von Bauarten Hauswaldt GmbH für die fachliche Unterstützung und die Bereitstellung der Prüfdaten, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

LITERATUR

- [1] DIN EN 1993–1–2:2010–12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, DIN Media GmbH.
- [2] DIN EN 1991–1–2:2010–12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1–2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991–1–2:2002 + AC:2009, DIN Media GmbH.
- [3] Jirku J., Wald F.: Influence of Zinc Coating to a Temperature of Steel Members in Fire. Journal of Structural Fire Engineering 6, No. 2, pp. 141–146, 2015.
- [4] Gaigl C.: Fire resistance of hot-dip galvanized steel structures, Dissertation TU München 2019.
- [5] DIN EN ISO 1461:2022–12, Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrachte Zinküberzüge (Stückverzinken) – Anforderungen und Prüfungen, DIN Media GmbH.
- [6] DIN EN ISO 14713–2:2020–05, Zinküberzüge – Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion – Teil 2: Feuerverzinken, DIN Media GmbH, DIN Media GmbH.
- [7] DIN EN 13381–8:2013–08, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen – Teil 8: Reaktive Ummantelung von Stahlbauteilen, DIN Media GmbH.
- [8] DIN EN 1993–1–2:2022–03 – Entwurf, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, DIN Media GmbH.
- [9] DIN EN 1363–2:1999–10, Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren, DIN Media GmbH.
- [10] Siegel R., Howell J.R., Lohrengel J.: Wärmeübertragung durch Strahlung, 1988, ISBN 3642832679, 9783642832673, Springer-Verlag.
- [11] DIN EN 1363–1:2020–05 Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1363–1:2020, DIN Media GmbH.
- [12] DASt-Richtlinie 022, Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen, 2016, ISBN: 9783941687035, Stahlbau Verlags und Service GmbH.
- [13] DASt-Richtlinie 027, Ermittlung der Bauteiltemperatur feuerverzinkter Stahlbauteile im Brandfall, 2020, ISBN: 9783941687325, Stahlbau Verlags und Service GmbH.
- [14] DIN EN ISO 25178–2:2023–09, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178–2:2021); Deutsche Fassung EN ISO 25178–2:2022.
- [15] DIN EN 60584–1:2014–07, Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen, DIN Media GmbH.

D r . S e b a s t i a n M o s c h e l

vorstand@igsb.eu

V o l k e r T h e w e s

info@igsb.eu

D r . M i c h a e l O v e r s

info@igsb.eu

M i c h a e l B i t t e r

info@igsb.eu

D r . M a g d a l e n a S o m m e r

info@igsb.eu

J é r ô m e D e B o y s e r e

info@igsb.eu

R o b i n R o h l e d e r

technik@igsb.eu

Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen e. V.
Hochend 115, D-47509 Rheurdt

D r . S e b a s t i a n H a u s w a l d t

s.hauswaldt@ibb-hauswaldt.de

M a r i e - S o p h i e L a u e r m a n n

m.lauermann@ibb-hauswaldt.de

IBB Hauswaldt GmbH

Koburger Straße 13, D-04277 Leipzig