

## REVIEW

# Geschraubte, gleitfest vorgespannte Verbindungen an feuerverzinkten Brückenbauteilen unter zyklischen Beanspruchungen

## Bolted, slip-resistant prestressed connections on hot-dip galvanized bridge components under cyclic loads

A.-K. Kraemer<sup>1</sup>  | M. Klein<sup>1</sup> | M. Oechsner<sup>1</sup> | J. Grote<sup>2</sup> | D. Ungermann<sup>2</sup>

*Ausgewählter Beitrag von der 13. Informations- und Diskussionsveranstaltung SCHRAUBENVERBINDUNGEN des deutschen Schraubenverbandes (DSV) und des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) der TU Darmstadt am 23./24.06.2021*  
*Selected contribution from the 13th information and discussion event BOLTED CONNECTIONS of the German Fastener Association (DSV) and the Center for Structural Materials (MPA-IfW) of the TU Darmstadt on 23./24.06.2021*

<sup>1</sup>Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) der TU Darmstadt, Darmstadt, Germany

<sup>2</sup>TU Dortmund – Institut für Stahlbau, Dortmund, Germany

### Correspondence

A.-K. Kraemer, Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) der TU Darmstadt, Grafenstraße 2, 64283 Darmstadt, Germany.  
Email: [anna-katharina.kraemer@tu-darmstadt.de](mailto:anna-katharina.kraemer@tu-darmstadt.de)

### Abstract

Feuerverzinkte Stahlbauten haben sich im Hochbau etabliert und gehören zum Stand der Technik. Sie erreichen Korrosionsschutzdauern in der Größenordnung der Lebensdauer des Bauwerks ( $\geq 100$  Jahre). Die Anwendung dieses Korrosionsschutzsystems hätte auch im Brückenbau ein großes Potenzial. Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit im Brückenbau sind neben den Neubaukosten insbesondere von den während der Lebensdauer anfallenden Unterhaltungskosten bestimmt. Ein erfolgreich abgeschlossenes Forschungsvorhaben zeigt, dass die Feuerverzinkung als Korrosionsschutz grundlegend und vorteilhaft einsetzbar ist. Die Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Bauteile hat nur geringe Einbußen gegenüber nicht verzinkten Stahlbauteile zu vermerken. Große Brückenkonstruktionen müssen mit Montagestößen ausgeführt werden. Geschweißte, feuerverzinkte Bauteile ziehen eine aufwändige Vor- und Nachbearbeitung des Korrosionsschutzes mit sich. Der nachträglich aufgebrauchte Korrosionsschutz erreicht bei weitem nicht die Schutzdauer einer Feuerverzinkung. Diese technologische Einschränkung kann vermieden werden, wenn die Ausführung der Montagestöße durch feuerverzinkte, geschraubte Anschlüsse erfolgt. Im Stahlbrückenbau hat sich der Einsatz von gleitfest vorgespannten (GV) Verbindungen bewährt. Für eine Anwendung von gleitfest vorgespannten Verbindungen bei feuerverzinkten Montagestößen fehlten bislang wesentliche wissenschaftliche Untersuchungen. Technische und wissenschaftliche Grundlagen zum Einsatz von feuerverzinkten

Dieser Open Access Beitrag steht unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution Non-Commercial NoDerivs License, die eine Nutzung und Verbreitung in allen Medien gestattet, sofern der ursprüngliche Beitrag ordnungsgemäß zitiert und nicht für kommerzielle Zwecke genutzt wird und keine Änderungen und Anpassungen vorgenommen werden.

© 2023 Die Autoren. *Materialwiss. Werkstofftech.* veröffentlicht von Wiley-VCH GmbH.

Schraubanschlüssen im zyklisch beanspruchten Stahl- und Verbundbrückenbau auf Basis des Eurocode 3 wurden erarbeitet und Berechnungsnachweise sowie Konstruktionsempfehlungen bereitgestellt.

#### SCHLÜSSELWÖRTER

Brückenbau, Feuerverzinkung, Lebensdauer, Schraubverbindung

#### Abstract

Hot-dip galvanized steel structures are well established and state of the art for public and industrial buildings. They can achieve a corrosion protection period in the magnitude of the lifetime of the structures ( $\geq 100$  years). The application of this corrosion protection system would also have great potential in bridge construction. Economic efficiency and sustainability in bridge construction are, in addition to the cost of new building, determined by the incurred maintenance costs. Various research projects demonstrate hardly any losses on the fatigue strength compared to the non-galvanized steel components. Large bridge structures must be designed with assembly joints. Welded site joints of hot-dip galvanized components require a complex pre- and post-treatment of the corrosion protection. Nevertheless, on-site applied corrosion protection cannot reach the protection durability of a hot-dip galvanizing. This technological restriction can be avoided by the use of hot-dip galvanized bolted connections. Slip-resistant pre-stressed connections are proved successful in steel bridge construction. Major scientific investigations are not yet available for the use of slip-resistant connections for hot-dip galvanized joints. Technical and scientific foundations for the application of hot-dip galvanized bolted connections in cyclically loaded steel and composite bridge constructions, based on the European standard for steel constructions, are investigated within the scope of this research project. Construction and design recommendations are provided.

#### KEYWORDS

bolt connection, bridge building, hot-dip galvanization, lifetime

## 1 | EINLEITUNG

Brückenkonstruktionen sind ausgelegt auf eine Lebensdauer von 100 Jahren. Die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit ist neben den Neubaukosten insbesondere von den während der Lebensdauer anfallenden Unterhaltungskosten bestimmt. Der übliche Korrosionsschutz bei Stahlbrücken in Form eines organischen Anstrichs muss alle 25 Jahre bis 30 Jahre erneuert werden und treibt somit die Unterhaltungskosten nach oben. Des Weiteren sind noch die finanziellen und umweltbelastenden Aspekte von Straßensperrungen und Verkehrsbehinderungen zu berücksichtigen.

Im Stahlhochbau hat sich die Feuerverzinkung für atmosphärisch beanspruchte Bauteile unter vorwiegend

ruhender Beanspruchung bewährt. Eine Korrosionsschutzdauer von vielen Jahrzehnten ohne Wartung und Instandhaltung ist die Regel. Die Korrosionsschutzdauer stimmt auch mit der Nutzungsdauer eines Brückenbauwerks überein. Das Forschungsprojekt „Feuerverzinkte Stahl- und Verbundbrücken“ hat gezeigt, dass die Feuerverzinkung grundlegend, mit großem Potenzial, einzusetzen ist [1]. Der Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit ist gering, die Unterhaltungskosten können hingegen drastisch reduziert werden. Die Erkenntnisse wurden in einem ersten Demonstratorbauwerk umgesetzt, Bild 1.

Die Vorteile der Feuerverzinkung können bisher im Brückenbau nicht genutzt werden. Wesentliche wissenschaftliche Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten



**BILD 1** Feuerverzinkte Stahlbrücke über die A44 in der Nähe von Kassel [1].

feuerverzinkter Brückenkonstruktionen und -details unter zyklischen Verkehrsbeanspruchungen müssen hierfür bereitgestellt werden [2]. Daher kann der für den bautechnischen Nachweis zu erbringende Ermüdungsnachweis nach Eurocode 3 (DIN EN 1993-2) bzw. Eurocode 4 (DIN EN 1994-2) nicht erbracht werden [3, 4]. Die Länge der feuerverzinkten Bauteile ist aufgrund der Abmessungen der Verzinkungsbäder und der Transportlängen begrenzt. Brücken müssen deshalb mit Montagestößen ausgeführt werden, die üblicherweise geschweißt werden. Da das Schweißen an verzinkten Bauteilen nach EN 1090-2 nicht zulässig ist, sind die Bereiche der Montagestöße beim Verzinkungsprozess mit einem Abdecklack zu beschichten [5]. Erst nach dem Verschweißen auf der Baustelle sind sie nachträglich mit einem geeigneten Korrosionsschutzsystem (z. B. thermisches Spritzen) zu versehen. Neben dem technischen Aufwand der Vor- und Nachbearbeitung bieten die thermisch gespritzten Stoßbereiche aufgrund der porigen Struktur reduzierte Schutzdauern. Zudem entstehen zwangsläufig Farbunterschiede zur feuerverzinkten Oberfläche. Es entsteht ein erheblicher Mehraufwand bei geschweißten Montagestößen auf der Baustelle und im Bauablauf. Feuerverzinkte, geschraubte Anschlüsse haben das Potenzial diese technologischen Einschränkungen zu eliminieren. Feuerverzinkte Schrauben haben sich seit Jahrzehnten im Stahlhochbau etabliert und entsprechen dem Stand der Technik [7, 8]. Bislang fehlen jedoch wesentliche wissenschaftliche Untersuchungen, die eine Anwendung von gleitfest vorgespannten Verbindungen für Montagestöße von feuerverzinkten Brückenbauteilen unter zyklischer Beanspruchung erlauben. Die technischen und wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz feuerverzinkter, geschraubter gleitfest vorgespannter Verbindungen (gleitfest vorgespannt) im zyklisch beanspruchten Stahl- und Verbundbrückenbau auf der Basis der Bemessungsvorschriften DIN EN 1993 und unter Beachtung der allgemeinen Ausführungsregelungen der DIN EN 1090-2 wurden von den Autoren erarbeitet und

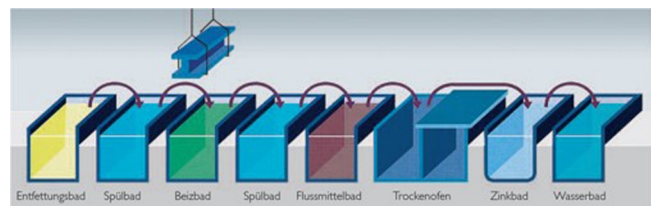
werden hier vorgestellt. Das Forschungsprojekt war zur Förderung einer ganzheitlichen Lösung für feuerverzinkte Stahl- und Verbundbrücken, einer innovativen, erwiesenermaßen nachhaltigen Brückenbauweise, zwingend erforderlich.

## 2 | STAND DER TECHNIK

Bei einer feuerverzinkten Stahlkonstruktion ist der zuverlässige Korrosionsschutz unter atmosphärischer Belastung in Korrosivitätskategorie C4 (Straßen, Brücken) und einer Überzugsdicke von 200–250  $\mu\text{m}$  auf ca. 100 Jahre gewährleistet. Bei geringerer Korrosivitätskategorie steigt die Korrosionsschutzdauer noch an [9]. Der aufgebrauchte Zinküberzug beschreibt dabei einen passiven Korrosionsschutz. Korrosive Medien werden durch die Deckschicht auf der Oberfläche des Bauteils vom Stahl ferngehalten. Darüber hinaus wirkt der Zinküberzug aber auch über die kathodische Schutzwirkung als aktiver Korrosionsschutz des Stahls. Hierbei wirkt das unedlere Zink als Opferanode.

Für den Verzinkungsprozess muss das Werkstück vorbereitet werden. Ziel ist es, die Bauteiloberfläche durch chemische Vorbehandlungen von arteigenen und artfremden Verunreinigungen zu säubern, um die gewünschte Reaktion des Stahls mit der Zinkschmelze zu erreichen. Hierzu werden die Stahlteile in mehreren Spül- und Beizbehandlungen gereinigt. Das Ziel dabei ist, eine metallisch reine Oberfläche zu erhalten. Der Ablauf des Verfahrens ist schematisch dargestellt, Bild 2 [10, 11].

Das Feuerverzinken von Stahlbauteilen kann in zwei Temperaturbereichen erfolgen. Der Schmelzpunkt von Zink liegt bei  $\vartheta = 416,5^\circ\text{C}$ , weshalb oft mit Schmelzen im sogenannten Normaltemperatur- (NT) Bereich um  $\vartheta = 450^\circ\text{C}$  gearbeitet wird. Das Erstarren des Zinks am kalten Werkstück wird vermieden, da genügend Energiereserven in der Schmelze sind, um bereits erstarrte Bereiche wieder aufzuschmelzen. Der Hochtemperatur- (HT-) Bereich liegt bei Temperaturen von  $\vartheta = 530^\circ\text{C}$  bis  $560^\circ\text{C}$ , die Überzugsdicken sind geringer. Im Hochtemperaturbereich nähert sich die Überzugsdicke einem



**BILD 2** Schematische Darstellung des Trockenverzinkens von Stückgut [11].

Maximalwert an, Begleitelemente des Stahls haben einen deutlich geringeren Einfluss auf die Eisen-Zink-Reaktionsgeschwindigkeit [12].

Das Hochtemperaturverzinken ist ein Schmelztauchverfahren, das aufgrund der beschränkten Größe der Zinkkessel aktuell bei Kleinteilen bis ca. 4 m zum Einsatz kommt. Über den Prozess kann die Zinküberzugsdicke (ca. 25  $\mu\text{m}$  bis 80  $\mu\text{m}$ ) gesteuert werden. Die Schutzwirkung eines hochtemperaturverzinkten Zinküberzuges ist in ihrer Wirkungsweise identisch mit der Normaltemperaturverzinkung. Spezielle Anforderungen wie gute Passgenauigkeit durch einheitliche Überzugsdicke und höhere Oberflächenhärte sind entscheidende Vorteile der Hochtemperaturverzinkung.

Der Überzug eines feuerverzinkten Stahls ist aus mehreren Eisen-Zink-Legierungsschichten aufgebaut, Bild 3. Aufsteigend befinden sich auf der Stahloberfläche Phasen mit der Bezeichnung  $\Gamma$  (gamma),  $\delta_1$  (delta) und  $\zeta$  (zeta). Den Abschluss bildet eine über den Fe-Zn-Kristallen liegende Reinzinkphase  $\eta$  (eta). Die  $\Gamma$ -Phase ist im Vergleich zu den anderen Phasen sehr dünn und meist kaum nachweisbar. Der Eisengehalt der Schichten nimmt von innen nach außen stark ab.

Bei der Hochtemperaturverzinkung entsteht eine durchlegierte harte Eisen-Zink-Legierungsphase ( $\delta_1$ -Phase). Die bei der NT-Verzinkung abschließende Reinzinkphase ( $\eta$ -Phase) bildet sich bei der Hochtemperaturverzinkung nicht aus. Dadurch wird eine größere Oberflächenhärte verbunden mit verbesserten Abrieb- und Verschleißigenschaften erreicht. Aufgrund der geringen Neigung zur Oberflächeneinebnung ist zu erwarten, dass vor der Hochtemperaturverzinkung aufgeraute Oberflächen auch während und nach dem Prozess des Aufbringens des Zinküberzuges ihre raue Oberflächenstruktur behalten, Bild 4. Somit sind bei diesem Verfahren die Vorteile der rauen Oberfläche im Hinblick auf

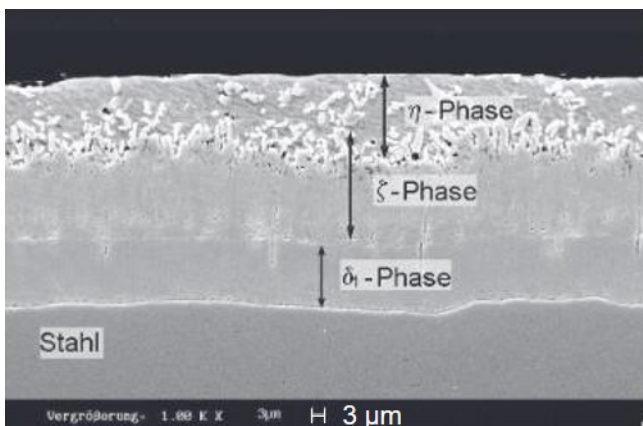


BILD 3 Aufbau eines Zinküberzugs auf Niedrigsilizium-Stahl durch Feuerverzinkung bei etwa 460 °C [10].



BILD 4 Beispiel einer mechanischen Reibflächenvorbereitung mit nachträglicher Hochtemperaturverzinkung.

die Haftreibung und die Vorteile des dauerhaften Korrosionsschutzes der Feuerverzinkung vereint. Außerdem ist aufgrund der geringeren Kriechneigung mit geringeren Verlusten der Vorspannkkräfte zu rechnen. Hochtemperaturverzinken ist jedoch aufgrund der existierenden Verzinkungsanlagen zurzeit auf eine Bauteillänge von ca. 4 m begrenzt. Somit können derzeit nur größtmäßig untergeordnete Bauteile einer geschraubten Verbindung hochtemperaturverzinkt werden. Allerdings sind Verbindungen von normaltemperaturverzinkten Fügepartnern als zu verbindende Stahlbauteile mit hochtemperaturverzinkten Laschen möglich und wurden grundlegend untersucht und die Verbindung optimiert.

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde ein im Stahlbau üblicher Baustahl mit einem Siliziumgehalt im oberen Bereich des Sebsty-Stahls (0,22 % Si) und vergleichend dazu eine Hochsilizium-Legierung (0,33 % Si) verwendet. Neben dem Schichtaufbau der Feuerverzinkung ist auch die Dicke des Überzuges abhängig vom Silizium- und Phosphorgehalt des Stahls [9].

## 2.1 | Gleitfest vorgespannte Verbindung

Maßgebliche Einflussfaktoren auf die Belastbarkeit von gleitfest vorgespannten Verbindungen sind die Vorspannkraft der Schraubenverbindung und der Haftreibwert der zu verbindenden Oberflächen. Durch die aufgebrachte Vorspannkraft ist eine Kraftübertragung über Reibung in den Kontaktflächen möglich. Dadurch werden die Schrauben nicht mit einer Querkraft belastet und die Verbindung kann höhere Ermüdungsbeanspruchungen ertragen. Aufgrund der höheren Belastbarkeit werden überwiegend hochfest vorgespannte Schraubenverbindungen (HV-)

TABELLE 1 Auszug aus DIN EN 1090-2: Gleitflächenklassen und Oberflächenbearbeitungen [4].

Gleitflächenklasse	$\mu$	Oberflächenbearbeitung
A	0,5	Strahlen der Oberfläche mit gängigen Strahlmitteln und Korngrößen, Entfernen von losem Rost, Zusammenbau metallisch blank
B	0,4	Strahlen mit anschließend aufgetragener Reibbeschichtung oder feuerverzinkt und sweepgestrahlt + Reibbeschichtung
C	0,35	Oberflächen feuerverzinkt und sweepgestrahlt
C	0,3	Oberfläche durch Flammstrahlen oder Drahtbürste gereinigt, Entfernen von losem Rost
D	0,2	Oberfläche im Walzzustand

verwendet. Der Gleitwiderstand  $F_{s,Rd}$  nach DIN EN 1993-1-8 hängt hauptsächlich von zwei Komponenten ab, Gleichung 1. Die Vorspannkraft  $F_{p,C}$  der Schrauben erzeugt die Haftfestigkeit zwischen den verbundenen Stahlbauteilen in Abhängigkeit der Anzahl  $n$  und des Beiwertes  $k_s$ . Die Oberflächengüte wird durch die Angabe eines Reibwertes  $\mu$  quantifiziert.

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_m} \cdot F_{p,C} \quad (1)$$

Die Stahlbaunorm DIN EN 1090-2 unterscheidet vier unterschiedliche Gleitflächenklassen A bis D für Oberflächen von Bauteilen, Tabelle 1. Diese unterscheiden sich durch verschiedene Oberflächenbehandlungen und geben jeweils passende Bereiche für den Haftreibwert  $\mu$  an, der in der ausgelegten Verbindung jederzeit zuverlässig vorhanden sein muss. Für abweichende Oberflächen ist ein Prüfverfahren nach Anhang G nötig, um den Haftreibwert  $\mu$  zu ermitteln. Für eine reine Feuerverzinkung gibt es keine Einstufung in eine Gleitflächenklasse. Bisherige Untersuchungen im Rahmen weiterer Forschungsprojekte befassten sich mit feuerverzinkten Oberflächen, die im Hochbau eingesetzt werden und anderen Randbedingungen und Schichtdicken unterliegen [13].

Bei gleitfest vorgespannte Schraubenverbindungen ist der Lochdurchmesser (abhängig vom Schraubendurchmesser) 2 mm–3 mm größer als der Durchmesser des Schraubenschafts. Der dadurch entstehende Hohlraum stellt eine höher beanspruchte Stelle im Korrosionsschutzsystem dar, da eintretende Feuchtigkeit nicht zügig abtrocknen kann. Der evtl. Einsatz von Tausalzen an Verkehrswegebrücken fördert die korrosive Belastung zusätzlich. Neben den durch Lochspiel vorhandenen Hohlräumen an den Schraubenlöchern könnten, bei starker Korrosionsbelastung, die äußeren Fugen einer geschraubten feuerverzinkten Laschenverbindung eine potenzielle Problemstelle im Korrosionsschutzsystem darstellen. Bei Anwendung organischer Beschichtungen

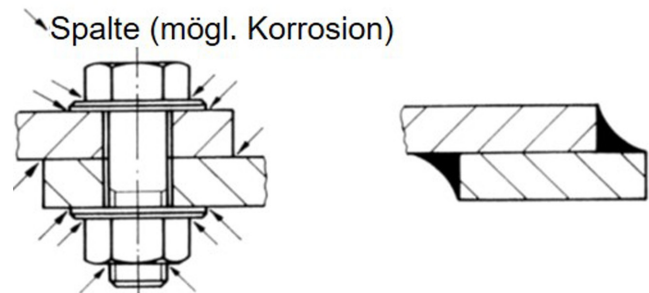


BILD 5 Korrosionsgefährdete Stellen (links) und Dichtstoffe in Fuge (rechts) [14].

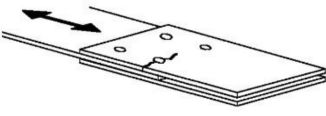
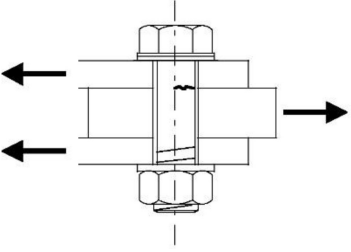
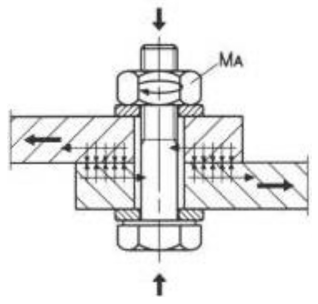
als Korrosionsschutzsystem müssen diese Schwachstellen nach dem Stand der Technik durch geeignete Dichtstoffe geschlossen werden, Bild 5 [14].

Für Zinküberzüge fehlen derartige Vorgaben. Wird die Dichtung der Montagefuge nicht fachgerecht ausgeführt, entsteht nach kurzer Zeit unter atmosphärischer Belastung die Gefahr der lokalen Korrosion in der Fuge oder des Spaltes an den für Elektrolyt zugänglichen Stellen und damit auch die Gefahr einer betriebsbedingten Wasserstoffaufnahme in hochfesten Schrauben.

Zyklische Belastungen von Stahlbauteilen führen zur Werkstoffermüdung, zur Rissbildung und zum Rissfortschritt. Der Nachweis der Ermüdung von Stahl- oder Verbundbrückenkonstruktionen erfolgt nach DIN EN 1993-1-9 (EC3-1-9) durch die Einordnung der Brückenkonstruktion und der konstruktiven Details in Kerbfälle [15]. Für geschraubte Verbindungen im Stahl- und Brückenbau sind nach EC3-1-9 mehrere Kerbdetails bedeutsam, Tabelle 2. Für zyklische Beanspruchungen ist die gleitfest vorgespannte-Verbindung besonders vorteilhaft, da die Kräfte über die durch Vorspannung erzeugte Reibfläche übertragen werden und dadurch keine nennenswerten Spannungsschwingbreiten auf die Schrauben einwirken.

Die Kerbfälle gelten bisher nur für unverzinkte Konstruktionen und können nicht auf feuerverzinkte Bauteile angewendet werden. Umfassende, wissenschaftliche Untersuchungen zu ermüdungsbeanspruchten gleitfest

TABELLE 2 Auszug aus DIN EN 1993-1-9, Tabelle 8.1 Kerbfälle und Konstruktionsdetails.

Kerbfall 112	Kerbfall 90	Kerbfall ?
		
<p>zweischrittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben</p>	<p>Passschrauben mit Scher-Lochleibungs-Beanspruchung</p>	<p>gleitfest vorgespannte Verbindung unter zyklischer Beanspruchung mit Vorspannkraftverlusten</p>

vorgespannte-Verbindungen von feuerverzinkten Stahlbauteilen fehlen. Es gibt weitere internationale Forschungsaktivitäten zu Reibwertermittlungen an feuerverzinkten Verbindungen unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten [16, 17]. Jede Feuerverzinkung ist anders, entwickelt einen anderen Aufbau und eine andere Überzugsdicke. Dadurch sind eine Grundcharakterisierung und Ermittlung der Reibwerte zunächst erforderlich. Im Rahmen dieser Forschung wurde eine vorteilhafte Kombination der Parameter entwickelt, die sowohl eine möglichst hohe Dauerfestigkeit und gleichzeitig eine wirtschaftliche Herstellung sicherstellt.

### 3 | DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN

#### 3.1 | Haftreibwertermittlung

Die Hauptparameter bei der gleitfest vorgespannte-Verbindung sind die Haftreibwerte der Oberflächen, die Vorspannkraft der Schrauben und die Ermüdungsfestigkeit. Die Haftreibwerte werden für verschiedene Feuerverzinkungen nach den Vorgaben der DIN EN 1090-2, Anhang G ermittelt. Für die Untersuchungen sind die Probengeometrien gemäß dieser Norm vorgeschrieben, Bild 6. Der Versuchsaufbau besteht aus zwei verzinkten Stahl-Fügepartnern (S355J2 + N, Blechdicke  $t=20\text{ mm}$ ), die über zwei verzinkte Stahl-Laschen (S355J2 + N,  $t=10\text{ mm}$ ) verschraubt (HV - M20 - 10.9 -  $t_{zn}$ ) werden. Die Kraftübertragung erfolgte während des Versuchs ausschließlich reibkraftschlüssig über die aufgebrachte Vorspannkraft.

Ziel der Untersuchungen war es, durch unterschiedliche Oberflächenbearbeitungen eine möglichst hohe Haftreibungszahl  $\mu$  zu erhalten, bei gleichzeitig moderatem Bearbeitungsaufwand. Zusätzlich wurde der

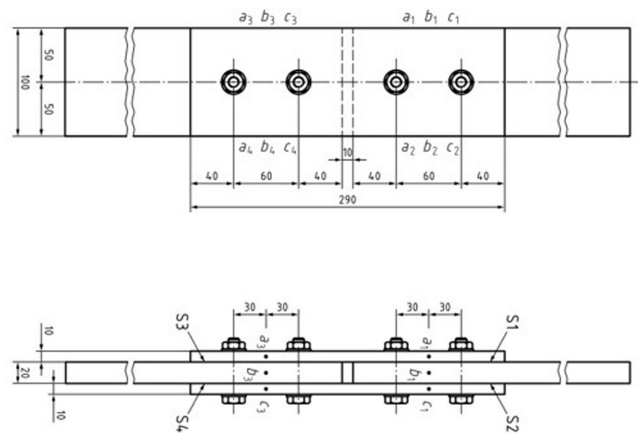


BILD 6 Prüfkörperabmessung in mm mit Schrauben M20 10.9 in Löchern mit 22 mm Durchmesser [5].

Einfluss der Zinküberzugsdicke und einer oberflächlichen Korrosion auf die Haftreibungszahl  $\mu$  untersucht. Es werden neben der Temperatur (NTV 450 °C und HTV 560 °C) auch die Tauchdauer der Verzinkung variiert und durch Stähle mit einem Siliziumgehalt im Sebsty-Bereich und im Hochsilizium-Bereich unterschiedliche Zinküberzüge erzeugt, Tabelle 3.

Im Bereich der Reibflächen der Fügepartner wurden unterschiedliche Oberflächenbearbeitungen durchgeführt, Tabelle 4. Zur Erzeugung einer Oberflächenrauigkeit wurde ausgehend vom unbearbeiteten Zustand die Oberfläche gestrahlt beziehungsweise zur weiteren Steigerung eine Zahnstruktur eingefräst, Bild 7. Diese wurden vor oder nach dem Verzinken durchgeführt, abhängig von der für das Bauteil gewählten Verzinkungstemperatur und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten.

Zur Durchführung der quasi-statischen Prüfungen und Kriechprüfungen wurden die Probekörper in einer Universalprüfmaschine belastet, Bild 8. An den vorgegebenen Stellen (DIN EN 1090-2, Anhang G) des

TABELLE 3 Überzugsdickenmessung.

Bauteil	Bearbeitung	Siliziumgehalt in Gew.-%	Tauchdauer in min	Überzugsdicke in $\mu\text{m}$
Fügepartner HSi1	HochSilizium – NTV	0,334	7,5	270–320
Fügepartner HSi2	HochSilizium – NTV	0,334	10	500–620
Fügepartner HSi3	HochSilizium – NTV	0,334	12,5	600–650
Fügepartner Seb1	Sebisty – NTV	0,224	10	370–400
Fügepartner Seb2	Sebisty – NTV	0,224	25	450–500
Fügepartner Seb3	Sebisty – NTV	0,224	40	540–630
Lasche	gestrahlt, HTV	0,224	5	120–150
Lasche	NTV, gefräst	0,224	10	480–520



BILD 7 Gestrahlte Oberfläche (links) und gefräste Zahnstruktur an der Oberfläche (rechts) einer Lasche.



BILD 8 Versuchsaufbau der quasi-statischen Prüfung inkl. Messinstrumente.

Prüfkörpers wurden die Relativverschiebungen mittels induktiver Wegaufnehmer gemessen. Um die eingebrachten Vorspannkraft direkt zu messen wurden instrumentierte Schrauben verwendet. Hierfür wurden

Dehnungsmessstreifen mittig im Schaft in die verwendeten Schrauben appliziert.

Die quasi-statischen Prüfungen wurden weggesteuert durchgeführt. Die Geschwindigkeit (0,003 mm/s) wurde so gewählt, dass die Vorgabe der Prüfdauer von 10 Minuten bis 15 Minuten eingehalten wurde [5]. Es gibt eine feste Reihenfolge nach DIN EN 1090-2, Anhang G für die Ermittlung der Reibwerte. Zunächst wird die Kurzzeitbelastbarkeit an je vier Probekörpern geprüft. Dies ist die maximale Zugbelastung bis zum Erreichen einer Differenzverschiebung zwischen den Punkten a beziehungsweise c und b von 0,15 mm, Bild 6. Anschließend wird in einem Kriechversuch geprüft, ob bei dauerhaft einwirkender Belastung eine zeitabhängige Verformung auftritt. Tritt dieses sogenannte Kriechen auf, sind weitere Untersuchungen in Form erweiterter Kriechprüfungen notwendig. Die Berechnung des Reibwertes  $\mu_i$  ist abhängig von der maximalen Gleitlast  $F_{Si}$  dividiert durch das Vierfache der Bemessungsvorspannkraft  $F_{p,c}$ , Gleichung 2. In allen Fällen wurde Gleitversagen der oberen und unteren Verbindung eines Prüfkörpers abgewartet. Nach dem Gleitversagen wurden die Prüfungen bis zu einem Erreichen von Gleitwegen bis 2 mm weitergeführt.

$$\mu_i = \frac{F_{Si}}{4 \cdot F_{p,c}} \quad (2)$$

Während der Versuche wurden die Kraft, die Verschiebung und die Gleitwege an den vorgegebenen acht Stellen, sowie die Vorspannkraft aller Schrauben gemessen. Das Kraft-Gleitweg-Verhalten zeigt sich für die untersuchten Oberflächen mit dem erwarteten Verhalten und kann nach DIN EN 1090-2 ausgewertet werden, Bild 9. Nach dem meist einseitigen Versagen einer Verbindung kann erneut Kraft aufgebaut werden, um auch die andere Seite zu prüfen. Die Gleitlast  $F_{Si}$  wird nach DIN EN 1090-2, Anhang G als Höchstkraft vor dem

TABELLE 4 Versuchsprogramm gleitfest vorgespannte-Verbindungen unter quasi-statischer Beanspruchung.

<b>Serie 1: Quasi-statische Prüfungen an Standardproben nach EN 1090-2, Anhang G mit unterschiedlichen Oberflächen</b>						
Gleitfest vorgespannte Schraub- verbindung zwischen		Lasche mit Oberflächenvorbereitung vor HT-Verzinkung			Lasche mit Oberflächenvorbereitung nach NT-Verzinkung	
Fügepartner mit NT- Verzinkung	Stahl/Zinkoberfläche	unbearbeitete Zink- oberfläche (Konf. A)	Strahlen (Konf. B)	Fräsen (Konf. C)	unbearbeitete Zink- oberfläche (Konf. D)	Fräsen (Konf. E)
	Sebistystahl unbearbeitete Zinkoberfläche (Konfiguration 1)	5 (davon 1 Kriechversuch)	5 (1)	5 (1)	5 (1)	5 (1)
	Sebistystahl gesweepte Zinkoberfläche (Konfiguration 2)	5 (1)	5 (1)	5 (1)	5 (1)	5 (1)
	Hochsiliziumstahl unbearbeitete Zinkoberfläche (Konfiguration 3)	5 (1)	4 (-)	4 (-)	4 (-)	4 (-)

<b>Serie 1: Quasi-statische Prüfungen an Standardproben nach EN 1090-2, Anhang G mit Oberflächen nach EN 1090-2, Tabelle 17</b>			
Gleitfest vorgespannte Schraub- verbindung zwischen		Lasche mit Oberflächenvorbereitung nach NT-Verzinkung	
Fügepartner mit NT- Verzinkung	Stahl/Zinkoberfläche	Gesweepte Zinkoberfläche	Gesweepte und ASI-beschichtete Zinkoberfläche
	Sebistystahl gesweepte Zinkoberfläche	4 (-)	-
	Sebistystahl gesweepte und ASI-beschichtete Zinkoberfläche	-	4 (-)

<b>Serie 2: Quasi-statische Prüfungen an Standardproben nach EN 1090-2, Anhang G, unter besonderer Berücksichtigung von Zinküberzugsdicken und Vorspannkraftverlusten</b>			
Gleitfest vorgespannte Schraub- verbindung zwischen		Lasche mit Oberflächenvorbereitung vor HT-Verzinkung	
Fügepartner mit NT- Verzinkung und optimaler Nach- behandlung aus AP2.1	Stahl/Zinkoberfläche	Optimum 1 aus AP2.1 NT-Verzinkung, Fräsen	Optimum 2 aus AP2.1 Strahlen, Hochtemperatur-Verzinkung
	Sebistystahl 3 Zinküberzugsdicken 370–400 µm 450–500 µm 540–630 µm	3×5 = 15 (davon 3 Kriechversuch)	3×5 = 15 (3)
	Hochsiliziumstahl 3 Zinküberzugsdicken 270–320 µm 500–620 µm 600–650 µm	3×5 = 15 (3)	3×5 = 15 (3)

Erreichen des Gleitmaßes von 0,15 mm abgelesen. Die mittleren, statischen Haftreibwerte  $\mu_m$  liegen für die unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen und Zinküberzüge zwischen 0,30 und 0,57. Die Übersicht über alle Ergebnisse ist nach den Untersuchungsreihen Oberflächenbearbeitung und Überzugsdickeneinfluss gegliedert, Bilder 10, 11.

Beim Vergleich der quasi-statischen Prüfungen untereinander lassen sich Einflüsse aufgrund der Beschaffenheit bzw. Rauigkeit der Oberfläche erkennen.

Verbindungen mit gefrästen Laschen zeigen deutlich höhere Haftreibungszahlen. Die gezahnte Struktur der gefrästen Oberfläche erreicht über das Einpressen in die Oberfläche des Fügepartners eine hohe quasi-statische Tragfähigkeit. Die hohen Werte können nur erreicht werden, wenn sich die gezahnte Geometrie infolge der Fräsung vollständig im Stahl befindet. Sind bei der Fräsung noch Restbestandteile an Feuerverzinkung auf der Spitze liegt die Haftreibungszahl ähnlich der gestrahlten Oberfläche. Bei der Betrachtung der unterschiedlichen



Stahllegierungen und Verzinkungstemperaturen ließen sich unterschiedliche Einflüsse auf die Haftreibungszahl erkennen. Mit zunehmender Überzugsdicke fällt die Haftreibungszahl der untersuchten Sebisty-Fügepartner, Bild 11. Auf dem Hochsiliziumstahl bildet sich ein fast vollständig durchlegierter Überzug, ähnlich dem der HTV. Diese Eisen-Zink-Legierungsphase besitzt eine höhere Härte als eine oberflächige Reinzinkschicht. Die Haftreibungszahl wird für diese Fügepartner daher nicht durch die Überzugsdicke beeinflusst.

Bei allen erweiterten Kriechversuchen konnte eine erhöhte Kriechneigung festgestellt werden. Es verblieben

nur 44% bis 74% der mittleren statischen Haftreibungszahlen nach Berücksichtigung des Kriechens. Die stark bearbeiteten Oberflächen (Kategorie E) oder beschichteten Oberflächen (ASI-Beschichtung/Gleitklasse B) zeigten hier eine größere Reduktion durch Kriechen, Bild 12. Die geringste Reduktion durch Kriechen zeigte die Verbindung, die nur einseitig eine oberflächige Reinzinkschicht besaß (Konfiguration 1 & B), Bild 13. Aber auch bei dieser Verbindung mit unterschiedlichen Oberflächen des Fügepartners und der Laschen verblieben lediglich 74% der mittleren statischen Haftreibungszahl nach Berücksichtigung der Kriechneigung.

Zusätzlich zu dem beschriebenen ausgeprägten Kriechverhalten kann auch ein Kriechen der Zinküberzüge senkrecht zur Oberfläche beobachtet werden, das zu Vorspannkraftverlusten führt. Diese müssen unterteilt werden in Setzverluste noch vor Versuchsbeginn und Verluste während der Versuchsdurchführung.

Einen Überblick über die Unterschiede der Vorspannkraftverluste direkt nach Montage gibt das Vorspannkraft-Zeit-Diagramm, Bild 14. In orange und gelb die NT-verzinkten und nachträglich gefrästen Varianten, die deutlich unterhalb der gestrahlten und hochtemperaturverzinkten Variante liegen. Die Differenz beträgt ca. 6%. Alle feuerverzinkten Verbindungen haben einen stärkeren Vorspannkraftabfall als die untersuchte unverzinkte (UV) gleitfest vorgespannte Verbindung. Die gemessenen Vorspannkraftverluste sind für die gängigen und nach Norm angegebenen Oberflächen auf 100 Jahre prognostiziert worden, Tabelle 5. Der höhere

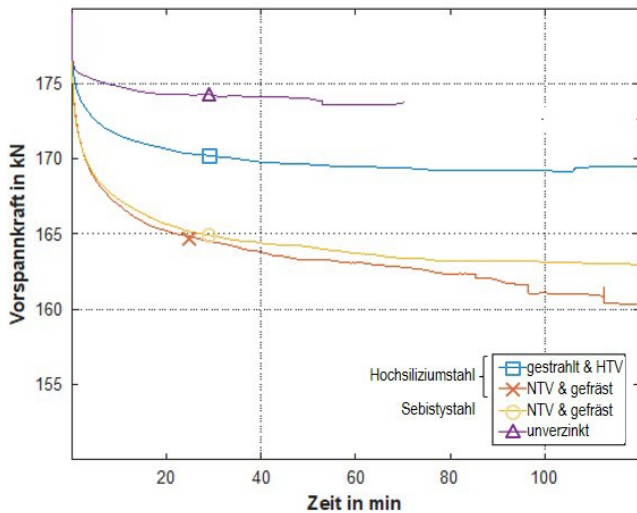


BILD 9 Exemplarisches Kraft-Gleitweg-Diagramm einer gleitfest vorgespannten Verbindung.

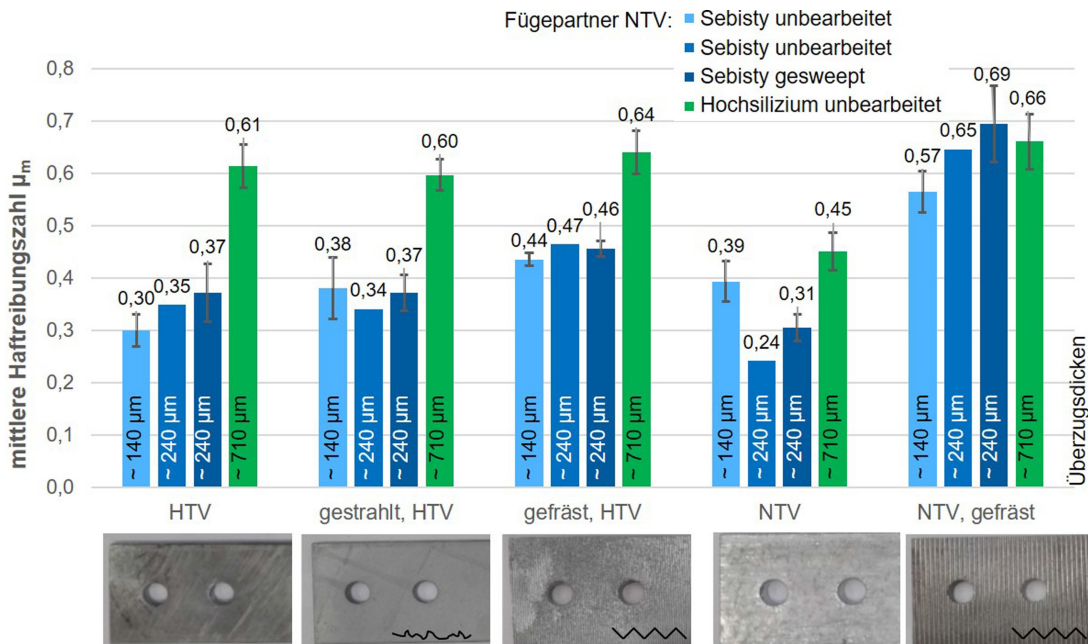


BILD 10 Ergebnisse der quasi-statischen Prüfungen, Serie 1.

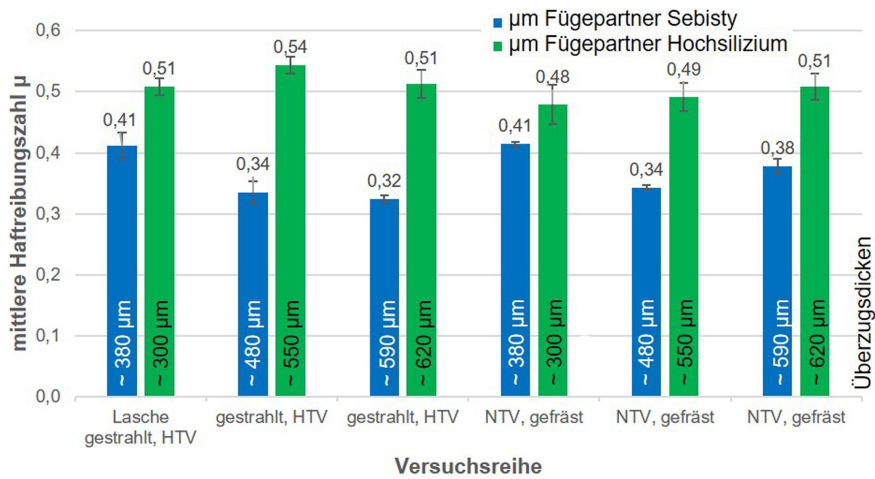


BILD 11 Ergebnisse der quasi-statischen Prüfungen, Serie 2 Überzugsdickeneinfluss.

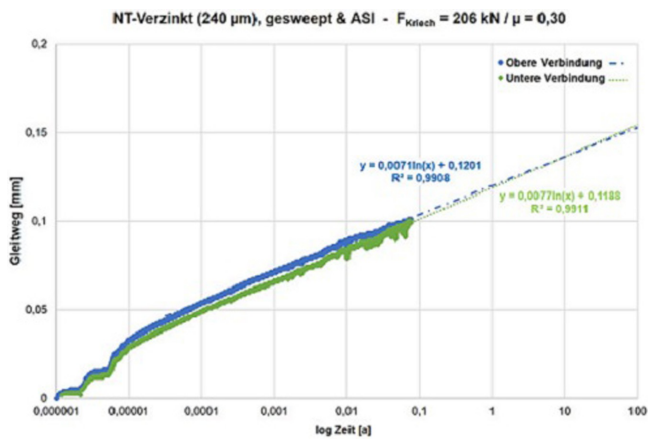


BILD 12 Exemplarisches Gleitweg-Zeit-Diagramm einer gleitfest vorgespannte-Verbindung NTV, gesweept & ASI.

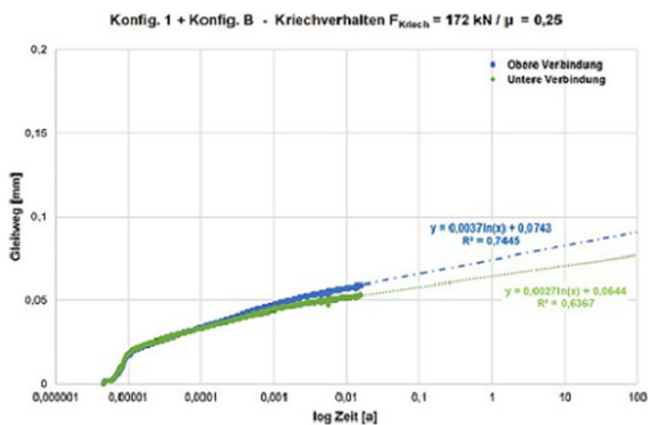


BILD 13 Exemplarisches Gleitweg-Zeit-Diagramm einer gleitfest vorgespannte-Verbindung Konf. 1 + B.

Vorspannkraftverlust bei den feuerverzinkten gleitfest vorgespannten Verbindungen kann durch ein

zeitversetztes Nachspannen der Schraubenverbindung deutlich reduziert werden.

Während der Versuchsdurchführung kommt es zu weiteren Vorspannkraftverlusten, ebenfalls in Abhängigkeit von der Oberflächenbearbeitung und der Verzinkung. Nach einer Wartezeit von ca. einer Stunde nach Erstanzug werden die Verbindungen erneut auf die zu erreichende Vorspannkraft nachgezogen. Unmittelbar danach wurde die Verbindung in die Prüfmaschine eingebaut und der Versuch gestartet. Zur Auswertung der Ergebnisse werden die Vorspannkraftverluste über die Versuchsdauer der Versuchsreihe gegenübergestellt, Tabelle 6.

Je größer die Überzugsdicke (z. B. HSi\_1 → HSi\_3) innerhalb einer Versuchsreihe wurde, desto kleiner wurde der Vorspannkraftverlust, der nach einem Zweitanzug während des Versuchs noch aufgetreten ist. Bei allen Untersuchungen mit Verzinkung auf Sebisty-Stahl war der Vorspannkraftverlust kleiner als bei den Versuchen mit Hochsilizium-Stahl.

Um eine Prognose der verbleibenden Vorspannkraft über die Lebensdauer des Bauwerkes zu geben, wurden einzelne Versuchskörper nach der Montage länger unbelastet gelagert. Die Vorspannkraftverluste wurden über den gesamten Zeitraum von etwa zwei Wochen kontinuierlich aufgezeichnet. Auf Basis der Daten konnte eine Extrapolation der Vorspannkraft auf eine Lebensdauer des Bauwerkes von 100 Jahren durchgeführt werden. Für alle untersuchten Oberflächen konnten verbleibende Vorspannkraften von über 90% für diese Lebensdauer prognostiziert werden.

Untersucht wurde ebenfalls, ob eine oberflächige Korrosion einen Einfluss auf den Haftreibbeiwert hat. Hierfür wurden quasi-statische Versuche und erweiterte Kriechprüfungen mit künstlich bewitterten Oberflächen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit

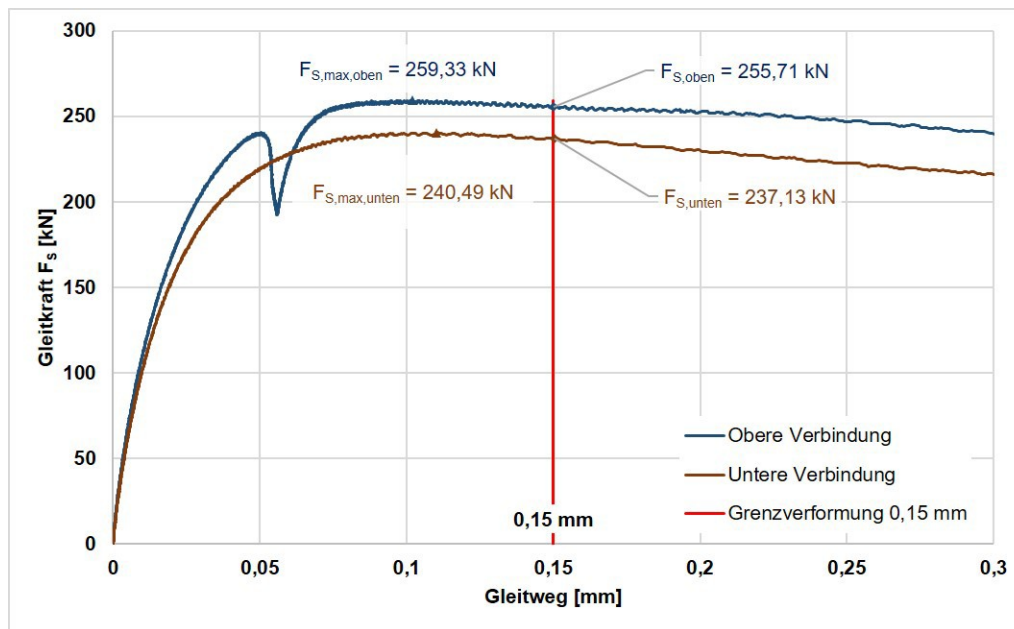


BILD 14 Vorspannkraft-Zeit-Diagramm der Mittelwertkurven je Versuchsreihe aus Serie 2.

TABELLE 5 Vorspannkraftverluste bei feuerverzinkten Oberflächen mit Prognose auf 100 Jahre.

Oberflächen	Montage	$F_{p, C, Start, m}$ in kN	$s_{Fp, C, 100a, m}$	$F_{p, C, 100a, m}$ in kN	$F_{p, C, 100a, m}$ in %
Mischverbindung Fügepartner Konf. 1 (250 $\mu\text{m}$ ) + Lasche Konf. B	Kombiniertes Verfahren	227,2	2,03	202,9	89,3
Gleitklasse B	Vorspannkraft-gesteuert	178,2	0,72	135,4	76,0
NT-Verzinkt (250 $\mu\text{m}$ ), gesweept & ASI-Beschichtung	Vorspannkraft-gesteuert + Nachspannen nach 24 Std.	178,8	0,18	147,7	82,6
	Kombiniertes Verfahren	223,2	4,43	181,4	81,2
Gleitklasse C	Vorspannkraft-gesteuert	179,0	1,0	138,9	77,6
NT-Verzinkt (250 $\mu\text{m}$ ) & gesweept	Vorspannkraft-gesteuert + Nachspannen nach 24 Std.	179,4	1,21	146,2	81,5
	Kombiniertes Verfahren	227,8	3,21	183,2	80,4

$F_{p, C, Start, m}$ : mittlere aufgebrachte Vorspannkraft nach der Rückfederung der Garnitur

$s_{Fp, C, 100a, m}$ : Standardabweichung der mittleren aufgebrachten Vorspannkraft  $F_{p, C, Start, m}$

$F_{p, C, 100a, m}$ : mittlere prognostizierte, verbleibende Vorspannkraft nach 100 Jahren

Referenzversuchen, die keine bewitterte Oberfläche aufwiesen, verglichen. Es zeigte sich, dass trotz starker Oberflächenkorrosion mit großer Weißrostbildung keine Abminderung der Tragfähigkeit erfolgte. Dies galt sowohl für die kurzfristige Tragfähigkeit als auch für die langfristige Tragfähigkeit unter der Berücksichtigung des Kriechens.

### 3.2 | Ermüdungsfestigkeit

Bei den zyklischen Versuchen an Kleinteilproben nach EN 1090-2, Anhang G, wird der Einfluss unterschiedlicher Spannungsschwingbreiten auf Haftreibungszahl, Setzverhalten und Vorspannkraftverlust mit im Versuchsverlauf zeitlicher Veränderung, erfasst.

Als Gleitlast wird nach DIN EN 1090-2, Anhang G.4, die Last bestimmt, bei der eine Gleitung von 0,15 mm auftritt. In diesem Fall kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass in der gleitfest vorgespannten Verbindung noch eine ideale Kraftübertragung über die Reibfläche erfolgt, die Vorspannung der Schrauben näherungsweise unverändert ist und die Schrauben keiner nennenswerten Spannungsschwingbreite aufgrund der Scherbeanspruchung unterliegen. Die Versuche werden in Anlehnung an den Versuchsaufbau der quasi-statischen Versuche aufgebaut. Die Prüfung erfolgt zugschwellend in einer servohydraulischen Prüfmaschine mit einem Lastverhältnis R von 0,1. Die maximale Spannungsschwingbreite lag bei 124 N/mm<sup>2</sup>, Tabelle 7.

**TABELLE 6** Mittlere Vorspannkraftverluste unterschiedlicher Überzugsdicken der quasi-statischen Prüfung nach EN 1090-2, Anhang G.

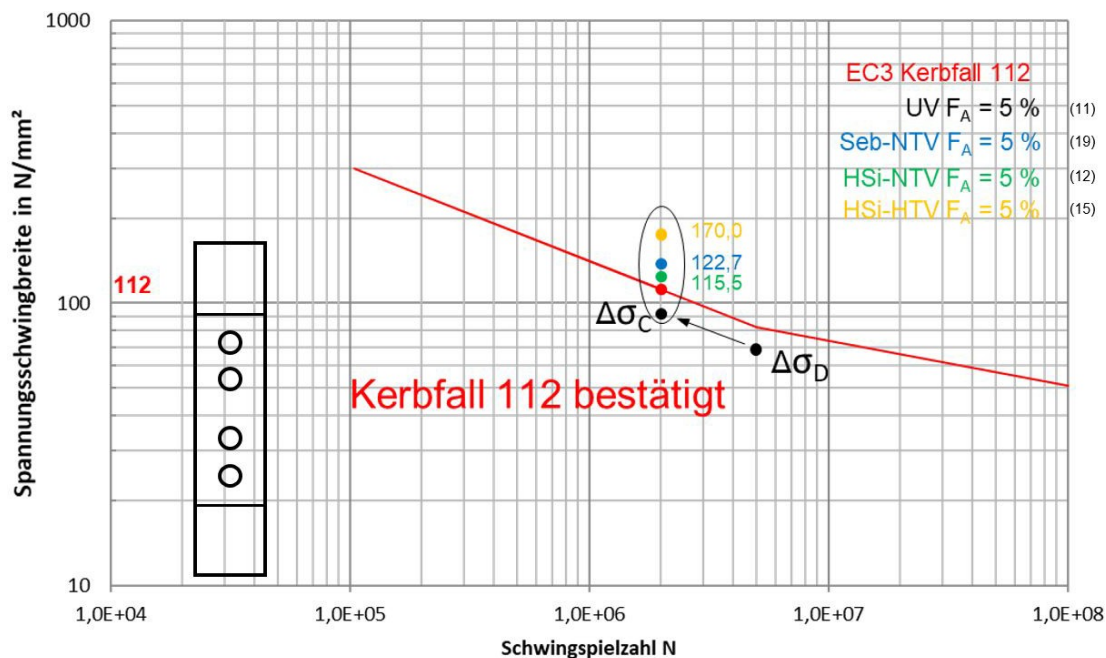
Bezeichnung der Verzinkung Fügepartner	Lasche gestrahlt, HTV	Lasche NTV, gefräst
	Vorspannkraftverlust in %	Vorspannkraftverlust in %
HSi_1~300 µm	8,1	19,5
HSi_2~550 µm	7,8	17,4
HSi_3~620 µm	6,1	17,2
Seb_1~380 µm	5,5	14,5
Seb_2~480 µm	4,1	11,1
Seb_3~590 µm	4,2	14,6

Die Ergebnisse der unterschiedlichen, feuerverzinkten Versuchsreihen liegen oberhalb der Wöhlerlinie des Kerbfalls 112, daher kann der Kerbfall auch für feuerverzinkte Bauteile bestätigt werden, Bild 15. Eine Abminderung ist nicht erforderlich.

In keiner der durchgeführten Untersuchungen trat ein Ermüdungsversagen auf, ebenso versagte nicht die Reibfläche bei den bisher untersuchten Lasten. Das Versagen der Verbindung trat durch ein Rutschen in der Trennfuge ein. Die in den zyklischen Untersuchungen auftretenden Verformungen in den Reibflächen waren deutlich kleiner als bei vergleichbaren Lasten im Zeitstandversuch. Ebenso zeigte sich mit steigender Zyklenzahl ein Rückgang der Verformungsgeschwindigkeit. Nach etwa 2 Mio. Zyklen nahmen die Verformungen nicht mehr zu.

Es folgte eine weitere Überprüfung der Ergebnisse aus den Kleinteilversuchen an brückenbautypischen, feuerverzinkten Stahlträgern (HEB 340 S355), Bild 16. Es wurden insgesamt vier Versuche durchgeführt. Vor den Versuchen wurden von allen Trägerenden die Imperfektionen vermessen. Um den Einfluss der fertigungsbedingten Imperfektionen überprüfen zu können, wurden die Trägerstöße unterschiedlich kombiniert. Die untersuchten Spannungsschwingbreiten in den Laschen des Stoßes lagen zwischen 116 N/mm<sup>2</sup> und 163 N/mm<sup>2</sup>.

Die untersuchten Oberflächen sind tragfähiger als diejenigen, die an den Kleinteilproben getestet wurden. Trotz identischer chemischer Zusammensetzung des Stahls und des Zinkbades wiesen die Träger aufgrund



**BILD 15** Wöhlerdiagramm zu Kerbfall 112, gleitfest vorgespannte-Verbindung mit Versuchsergebnissen der feuerverzinkten Probekörper.

TABELLE 7 Versuchsprogramm gleitfest vorgespannte-Verbindungen unter zyklischer Beanspruchung.

Serie 1: Gleitfest vorgespannte Verbindungen mit variierten Zinküberzugsdicken und Oberflächenvorbereitung				
Gleitfest vorgespannte Schraubverbindung zwischen		Lasche mit Oberflächenvorbereitung vor/nach Feuerverzinkung		
Fügepartner mit NT-Verzinkung	Stahl/Zinkoberfläche	Konfiguration B Gestrahlt & HTV	Gleitklasse C NTV & Gesweept (250 µm)	Gleitklasse B NTV, Gesweept & ASI (250 µm)
	Konfiguration 1 Sebistystahl unbearbeitet (250 & 500 µm)	×	–	–
	Gleitklasse C Sebistystahl Gesweept (250 µm)	–	×	–
	Gleitklasse B Sebistystahl Gesweept & ASI (250 µm)	–	–	×
Serie 2: Variation gleitfest vorgespannte und SLP-Verbindungen, unverzinkt oder NT-verzinkt				
Gleitfest vorgespannte Schraubverbindung zwischen		Lasche mit/ohne Oberflächenvorbereitung		
Fügepartner mit NT-Verzinkung	Stahl/Zinküberzug	unverzinkt	NT-verzinkt	HT-verzinkt
	Sebistystahl unverzinkt	×	–	–
	Sebistystahl NT-Verzinkung	–	×	–
	Hochsiliziumstahl NT-Verzinkung	–	×	–
	Hochsiliziumstahl NT-Verzinkung	–	–	×
SLP-Schraubverbindung zwischen		Lasche		
Fügepartner	Stahl/Zinküberzug	NT-verzinkt		
	Sebistystahl NT-Verzinkung	×		

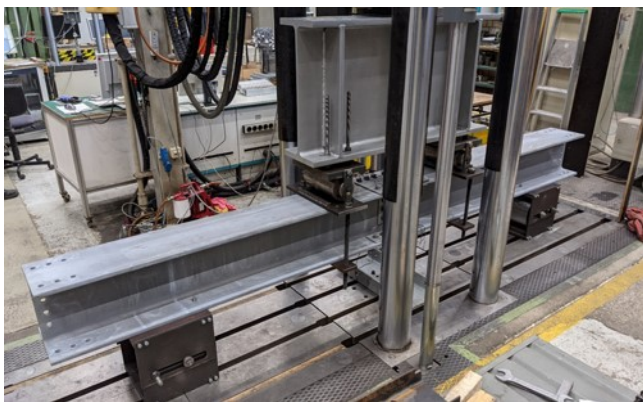


BILD 16 Aufbau zur Untersuchung von brückenbautypischen, feuerverzinkten Trägern mit gleitfest vorgespannten Verbindungen.

des größeren Volumens und den damit verbundenen Nachwärmeeffekten einen veränderten Aufbau des Zinküberzugs in Form eines durchlegierten Eisen-Zink-Überzugs auf. Vergleicht man die Ergebnisse mit weiteren aus der Literatur so ordnen sich die Werte auch dort oberhalb des Kerbfalls 112 ein und dieser kann weiterhin bestätigt werden [18, 19].

Für gelochte Stahlbleche muss nach DIN EN 1993-1-9 ein zusätzlicher Nachweis geführt werden [15]. Der Kerbfall für diese Bleche ist der Kerbfall 90. Die verschiedenen Oberflächenvorbereitungen wurden überprüft, Tabelle 8, Bild 17. Als Kerbstelle wird ein mittiges Loch, in der Größe der untersuchten gleitfest vorgespannte-Verbindungen gewählt. Die Ermüdungsversuche wurden zugschwellend ausgeführt. Die Ergebnisse liegen im 5% Quantil bei 2 Millionen

TABELLE 8 Versuchsprogramm Ermüdungsfestigkeit unverzinkter und hochtemperaturverzinkter, gelochter Bleche.

Gelochte Lasche 340 × 100 × 10 mm							
Unverzinkt		Oberflächenvorbereitung nach NT-Verzinkung			Oberflächenvorbereitung vor HT-Verzinkung		
keine	fräsen	keine	fräsen	keine	strahlen	fräsen	

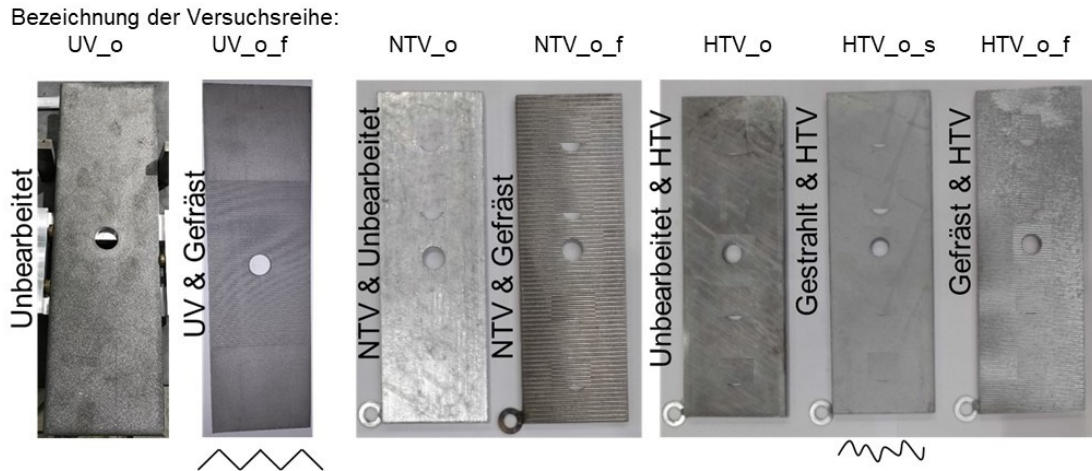


BILD 17 Darstellung der Oberflächen der untersuchten Blechproben.

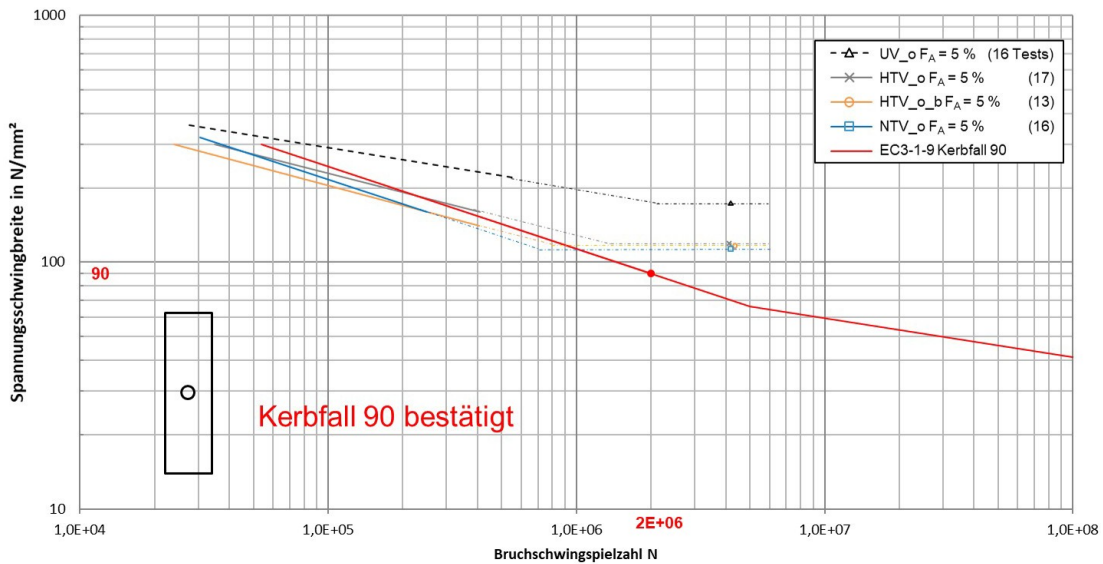


BILD 18 Wöhlerdiagramm zu Kerbfall 90, gelochtes Blech unverzinkt und feuerverzinkt.

Schwingspielen noch höher als die Bemessungswöhlerlinie für den entsprechenden Kerbfall 90, Bild 18. Der Kerbfall 90 kann für die gestrahlten Oberflächenvorbereitungen bestätigt werden. Der Einfluss aus unterschiedlichen Blechdicken kann aus Vorversuchen im Rahmen dieses Projekts ausgeschlossen werden.

Werden schärfere Oberflächenbearbeitungen, wie die gefräste Zahnstruktur vor oder nach der Feuerverzinkung in das Bauteil eingebracht, kann der Kerbfall nicht

mehr bestätigt werden, Bild 19. Hier muss um einen Kerbfall, auf Kerbfall 80, abgemindert werden.

#### 4 | ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen der quasi-statischen Tragfähigkeit von feuerverzinkten gleitfest vorgespannten Verbindungen zeigten großes Potenzial für den Einsatz im

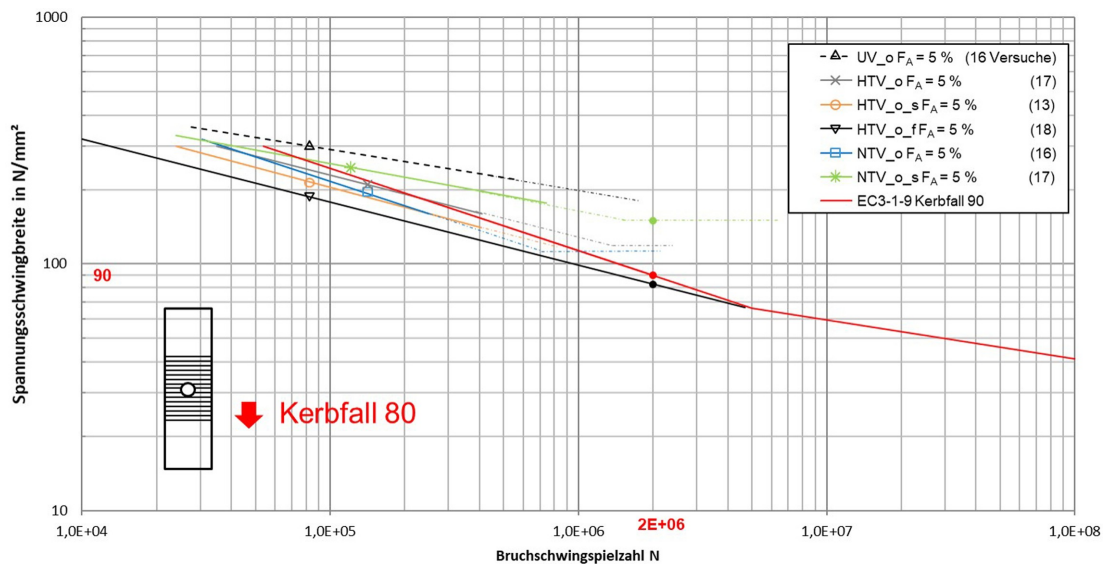


BILD 19 Wöhlerdiagramm zu Kerbfall 90, gelochtes und mit gefräster Zahnstruktur versehenes Blech, unverzinkt und feuerverzinkt.

Brückenbau. Vorteilhafter erwiesen sich oberflächige Eisen-Zink-Legierungsphasen und Stähle mit einem hohen Siliziumgehalt. Aufgrund der geforderten Mindestüberzugsdicken sind weniger tragfähige oberflächige Reinzinkphasen stärker verbreitet. Eine Begrenzung der Zinküberzugsdicken ist erforderlich und wird im Folgenden auszugsweise wiedergegeben [20].

Auf Basis der Untersuchungen können drei Oberflächenkombinationen für feuerverzinkte gleitfest vorgespannte Verbindungen im Brückenbau empfohlen werden:

I und II: Die beiden in DIN EN 1090-2, Tabelle 17 enthaltenen feuerverzinkten Oberflächen können mit reduzierten Haftreibungszahlen und einer max. Zinküberzugsdicke von 250  $\mu\text{m}$  eingesetzt werden. Die Schrauben dieser Verbindungen müssen nach dem ersten Setzen nachgespannt werden (Weiterdrehwinkel 15°).

III: Die Verbindung mit unterschiedlichen Oberflächen auf Fügepartner und Laschen (Fügepartner: niedrigtemperaturverzinkt  $\leq 350 \mu\text{m}$  & Lasche: Oberfläche gestrahlt + hochtemperaturverzinkt) kann ohne weitere Vorgaben eingesetzt werden.

Es wurden diese für den Brückenbau geeigneten feuerverzinkten gleitfest vorgespannten Verbindungen in zyklischen Untersuchungen hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit überprüft. Es konnte gezeigt werden, dass die Kriterien für den Kerbfall 112 von den empfohlenen feuerverzinkten gleitfest vorgespannten Verbindungen erfüllt werden.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden in Form eines Bemessungskonzeptes und von Montage- und Korrosionsschutzhinweisen für den Einsatz von feuerverzinkten gleitfest vorgespannten Verbindungen im Brückenbau aufbereitet [20].

## FÖRDERHINWEIS

Das IGF-Vorhaben „Geschraubte, gleitfest vorgespannte Verbindungen an feuerverzinkten Brückenbauteilen unter zyklischen Beanspruchungen“, IGF-Projekt Nr. 19444 BG, des GAV – Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V., Mörsenbroicher Weg 200 in 40470 Düsseldorf wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir möchten uns an dieser Stelle bei den fördernden Institutionen für die gute Zusammenarbeit herzlich bedanken.

## DANKSAGUNG

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

## ORCID

A.-K. Kraemer  <http://orcid.org/0000-0002-7175-0111>

## REFERENCES

1. D. Ungermann, D. Rademacher, M. Oechsner, R. Landgrebe, J. Adelmann, F. Simonsen, S. Friedrich, P. Lebelt, FOSTA P835 – IGF-Nr. 351 ZBG, FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, 2014.
2. A.-K. Kraemer, M. Klein, M. Oechsner, J. Grote, D. Ungermann, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 2021, 52, 202.
3. Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1993-2*, AC:2009, 2010–12.
4. Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1994-2*, AC:2008, 2010–12.
5. Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1090-2*, 2018–09.

6. D. Ungermann, D. Rademacher, T. Pinger, O. Hechler, Entwurfshilfe zum Einsatz von feuerverzinkten Bauteilen im Stahl- und Verbundbrückenbau, *Bauforumstahl e.V., Nr. B 505*, **2016**.
7. F. Simonsen, J. Weber, R. Rennert, M. Oechsner, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **2018**, 49, 703.
8. M. Oechsner, J. Beyer, F. Simonsen, P. Schaumann, R. Eichstädt, präsentiert auf *METEC & 2nd ESTAD 2015*, ISBN 978-3-00-049542-7, European Steel Technology and Application Days, Düsseldorf, **2018**.
9. Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN ISO 14713-1*, 2017–08.
10. W.-D. Schulz, M. Thiele, *Feuerverzinken von Stückgut*, Leuze Verlag KG, Bad Saulgau, **2012**.
11. Institut Feuerverzinken, *Korrosionsschutz durch Feuerverzinken*, Arbeitsblatt A.2, **2021**.
12. P. Peißker, M. Huckshold, P. Maaß, *Handbuch Feuerverzinken*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, **2016**.
13. N. Afzali, N. Stranghöner, Siroco – Execution and reliability of slip-resistant connections for steel structures using CS and SS, Duisburg-Essen, European Commission, **2017**.
14. TAW-Verlag, *Korrosion und Korrosionsschutz von Werkstoffen – Teil II, Vorlesungsskript*, Wuppertal, **2007**.
15. Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1993-1-9*, AC:2009, 2010–12.
16. A. Cruz, R. Simões, R. Alves, *Journal of Constructional Steel Research*, **2012**, 70, 280.
17. J. Maljaars, M. Euler, *International Journal of Fatigue* **2021**, 151, 106355.
18. F. Berto, S. M. J. Razavi, M. R. Ayatollahi, F. Mutignani, *Procedia Structural Integrity* **2017**, 3, 77.
19. G. Valtinat, H. Huhn, *Stahlbau* **2003**, 72, 715.
20. D. Ungermann, J. Grote, M. Oechsner, A.-K. Kraemer, S. Friedrich, P. Lebelt, GAV Bericht Nr. 172 – IGF-Nr. 19444 BG, *GAV – Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.*, Düsseldorf, **2021**.

**How to cite this article:** A.-K. Kraemer, M. Klein, M. Oechsner, J. Grote, D. Ungermann, *Materialwiss. Werkstofftech.* **2023**, 54, e202100254. <https://doi.org/10.1002/mawe.202100254>