

**Dieter Ungermann, Johannes Grote**

Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau

**Matthias Oechsner, Marcus Klein, Anna-Katharina Kraemer**

Technische Universität Darmstadt, Zentrum für Konstruktionswerkstoffe

Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt und Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde Darmstadt

**Susanne Friedrich, Peter Lebelt**

Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH, Dresden

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

Bericht Nr. 172

Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.

2021

Forschungsnetzwerk  
Mittelstand



Industrielle  
Gemeinschaftsforschung



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Dieser Bericht stellt die Ergebnisse eines Forschungsprojektes der AiF-Forschungsvereinigung GAV dar. Die Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) gefördert; AiF-Forschungsvorhaben IGF 19444 BG.

### **Kurzzusammenfassung**

Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit im Brückenbau sind neben den Neubaukosten insbesondere von den während der Lebensdauer anfallenden Unterhaltungskosten bestimmt. Ein erfolgreich abgeschlossenes Forschungsvorhaben [1] zeigt, dass die Feuerverzinkung als Korrosionsschutz grundlegend und vorteilhaft einsetzbar ist. Feuerverzinkte Brückenkonstruktionen können eine Korrosionsschutzdauer in der Größenordnung der Lebensdauer einer Brücke ( $\geq 100$  Jahre) erreichen. Die Ausführung von feuerverzinkten Stahlbauten hat sich im Hochbau etabliert und gehört zum Stand der Technik. Forschungsprojekte ergaben im Bereich der Ermüdungsfestigkeit der feuerverzinkten Bauteile im Brückenbau kaum Einbußen gegenüber nicht verzinkten Stahlbauteile. Geschweißte Montagestöße an feuerverzinkten Bauteilen einer Brücke ziehen jedoch eine aufwändige Vor- und Nachbearbeitung des Korrosionsschutzsystems im Schweißnahtbereich unter Baustellenbedingungen nach sich. Der durch thermisches Spritzen von Zink oder Zinklegierungen im Schweißnahtbereich nachträglich aufgebrachte Korrosionsschutz bietet Fehlerpotential bei der Ausführung und erreicht in Abhängigkeit von Schichtdicke und Porosität die Schutzdauer der kompakten Feuerverzinkung möglicherweise nicht. Diese technologische Einschränkung im Korrosionsschutz 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 GV-Verbindungen bei feuerverzinkten Montagestößen fehlten bislang wesentliche wissenschaftliche Untersuchungen. Technische und wissenschaftliche Grundlagen zum Einsatz von feuerverzinkten Schraubanschlüssen im zyklisch beanspruchten Stahl- und Verbundbrückenbau auf Basis des Eurocode 3 wurden erarbeitet und Berechnungsnachweise sowie Konstruktionsempfehlungen bereitgestellt.

## **Abstract**

Economic efficiency and sustainability in bridge construction are, in addition to the cost of new building, determined by the incurred maintenance costs. Hot-dip galvanized bridge constructions can achieve a corrosion protection period in the magnitude of the lifetime of the bridges ( $\geq 100$  years). Hot-dip galvanized steel structures are well established and state of the art for public and industrial buildings. Various research projects demonstrate hardly any losses on the fatigue strength compared to the non-galvanized steel components in bridge structures. Welded site joints of hot-dip galvanized components in bridge structures require a complex pre- and post-treatment of the corrosion protection in the weld area under site conditions. The corrosion protection subsequently applied by thermal spraying of zinc or zinc alloys in the weld area offers potential for errors during execution and, depending on the layer thickness and porosity, may not reach the protection duration of the compact hot-dip galvanising. This technological restriction in the corrosion protection 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.

### Einleitung

Brückenkonstruktionen sind auf eine Nutzungsdauer von aktuell 70 bis 110 Jahren ausgelegt [2]. Die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit eines Brückenbauwerkes werden neben den Neubaukosten insbesondere von den während der Nutzungsdauer anfallenden Unterhaltungskosten bestimmt. Die für den Korrosionsschutz von Stahlbrücken im Verkehrswegebau gemäß ZTV-ING [3] und DIN 1076 [4] eingesetzten organischen Beschichtungssysteme müssen nach aktuellem Stand alle 30 Jahre erneuert werden und tragen somit zur Erhöhung der Unterhaltungskosten für die Brückenbauwerke bei [5]. Straßensperrungen und Verkehrsbehinderungen sind dabei noch nicht einberechnet.

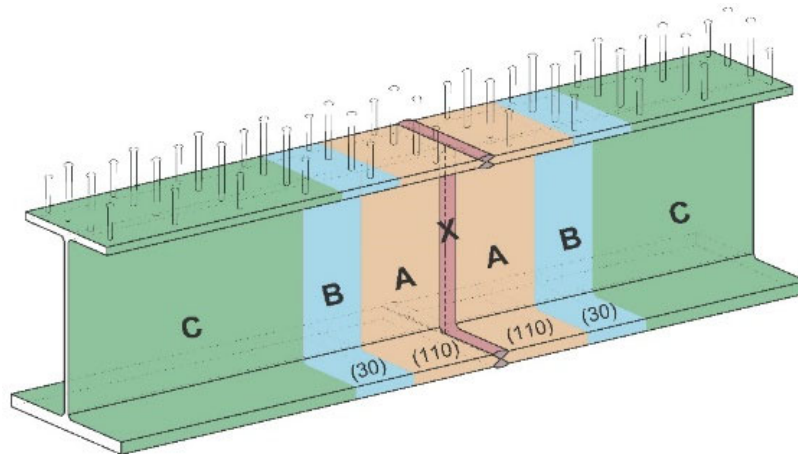
Im Stahlhochbau hat sich die Feuerverzinkung für atmosphärisch beanspruchte Bauteile unter vorwiegend ruhender Beanspruchung bewährt. Eine Korrosionsschutzdauer von vielen Jahrzehnten ohne Wartung und Instandhaltung ist die Regel. Das Forschungsprojekt „Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau“ [1] hat gezeigt, dass die Feuerverzinkung grundlegend und mit großem Potential einsetzbar ist. Die Korrosionsschutzdauer der Feuerverzinkung übertrifft oder stimmt bei entsprechender Ausführung mit der Nutzungsdauer des Brückenbauwerks bis zu einer Korrosivitätskategorie C4 überein. Der Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit ist gering, die Unterhaltungskosten können hingegen drastisch reduziert werden. Die Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten „Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau“ und „Herstellen von reparaturfähigen Feuerzinküberzügen“ [6] wurden in einem ersten Demonstratorbauwerk, siehe Abbildung 1, umgesetzt.



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

Die im Bild gezeigten feuerverzinkten Brückenträger des Überführungsbauwerkes wurden durch die Abmessungen der Verzinkungsbäder und Einschränkungen in den Transportlängen begrenzt und mussten aus drei Teilstücken je Brückenträger gefertigt werden. An derartigen Brückentypen müssen bei dieser Bauweise Montagestöße ausgeführt werden, die üblicherweise geschweißt werden. Da das Schweißen an verzinkten Bauteilen gemäß DIN EN 1090-2 [7] nicht zulässig ist, sind die Bereiche der Montagestöße vor der Feuerverzinkung mit einem Abdecklack zu beschichten um die Zinkannahme im Schweißnahtbereich zu verhindern [8]. Erst nach dem Verschweißen auf der Baustelle werden die Schweißnahtbereiche mittels Druckluftstrahlen vorbereitet und nachträglich mit einem Korrosionsschutzsystem aus thermisch gespritztem

Zink oder Zinklegierungen gemäß DIN EN ISO 2063 und anschließender poren-schließender Versiegelung versehen [9] (Siehe Bereiche A und B in Abbildung 2).



**Abbildung 2** Prinzipielle Ausführung von feuerverzinkten Montagestöße [1]

Neben dem technischen Aufwand der Vor- und Nachbearbeitung bieten die thermisch gespritzten Zinküberzüge im Schweißnahtbereich aufgrund der porigen Struktur und dem Fehlerpotential bei der Ausführung die Gefahr reduzierter Korrosionsschutzdauer. Zudem entstehen zwangsläufig Farbunterschiede zur kompakten feuerverzinkten Oberfläche. Des Weiteren entsteht ein erheblicher Mehraufwand bei geschweißten Montagestößen auf der Baustelle der im Bauablauf eingeplant werden muss.

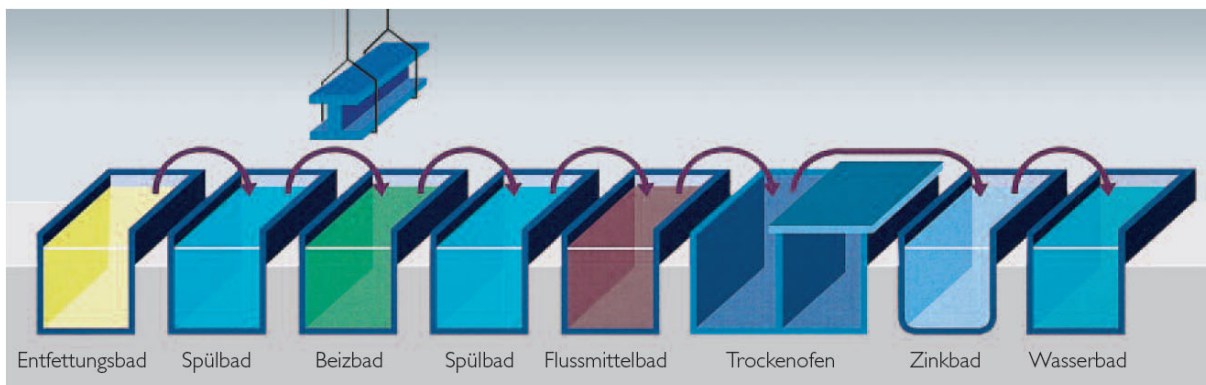
Die genannten technologischen Einschränkungen könnten vermieden werden, wenn die Ausführung durch feuerverzinkte, geschraubte Anschlüsse erfolgen würde. Feuerverzinkte Schrauben haben sich seit Jahrzehnten im Stahlhochbau etabliert und entsprechen dem Stand der Technik. Die Vorteile der Feuerverzinkung konnten bisher im Brückenbau mit GV-Verbindungen (gleitfest vorgespannt) nicht vollständig genutzt werden. Wesentliche wissenschaftliche Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten geschraubter GV-Verbindungen für Montagestöße feuerverzinkter Brückenkonstruktionen und -details unter zyklischen Verkehrsbeanspruchungen fehlten und der für den bautechnischen Nachweis zu erbringende Ermüdungsnachweis nach Eurocode 3 (DIN EN 1993-2) [10] bzw. Eurocode 4 (DIN EN 1994-2) [11] konnte bisher nicht erbracht werden.

Das hier beschriebene Forschungsvorhaben hat die technischen und wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz feuerverzinkter, geschraubter GV-Verbindungen 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 im Stahl- und Verbundbrückenbau und eine Lösung für den Korrosionsschutz der Fugen und Spalte des geschraubten Montagestoßes durch Abdichten mit Dichtstoffen erarbeitet. Das durchgeführte Forschungsprojekt war zur Förderung einer ganzheitlichen Lösung für feuerverzinkte Stahl- und Verbundbrücken, einer innovativen, erwiesenermaßen nachhaltigen Brückenbauweise, zwingend erforderlich.

## Grundlagen zur Feuerverzinkung

Bei einer feuerverzinkten Stahlkonstruktion ist der zuverlässige Korrosionsschutz unter atmosphärischer Belastung in Korrosivitätskategorie C4 (Straßen, Brücken) und einer Überzugsdicke von 200 – 250 µm auf ca. 100 Jahre einzuschätzen. Bei einer geringeren Korrosivitätskategorie wesentlich länger. [12] Der aufgetragene Zinküberzug wirkt dabei zunächst als passiver Korrosionsschutz. Korrosive Medien werden durch die karbonatische Deckschicht auf der Oberfläche des Zinküberzugs vom Stahlbauteil ferngehalten. Darüber hinaus wirkt der Zinküberzug aber auch als aktiver kathodischer Korrosionsschutz des Stahls. Hierbei wirkt das unedlere Zink bei einer Ritzverletzung bis zum Stahlsubstrat als Opferanode und schützt so den Stahl.

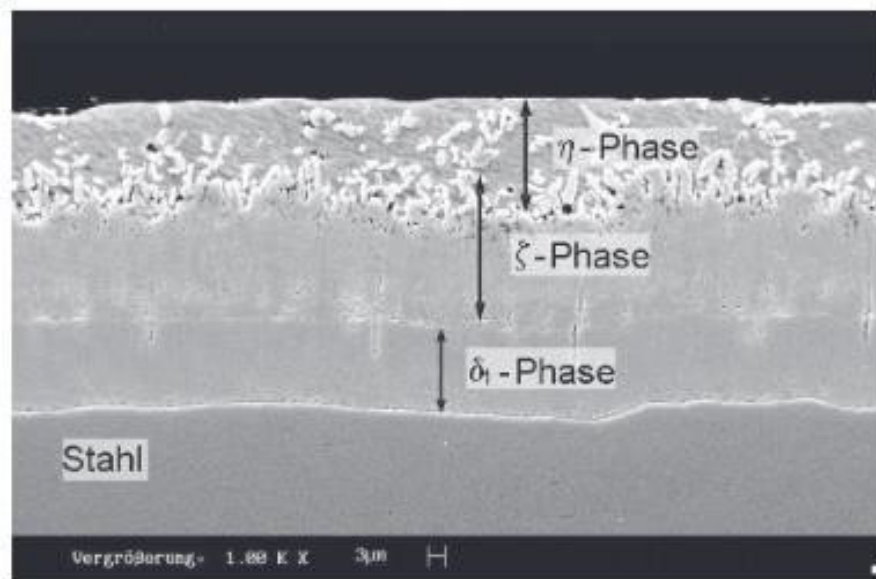
Es gibt verschiedene Feuerverzinkungs-Verfahren, hauptsächlich wird zwischen dem Bandverzinken und dem Stückverzinken unterschieden. Bei der im Projekt verwendeten Stückverzinkung wird die Bauteiloberfläche des Werkstücks durch Entfettung, mehreren Spülvorgängen und Beizen, von arteigenen und artfremden Verunreinigungen gesäubert und vorbereitet, um eine metallisch reine Oberfläche für eine fehlerfreie Zinkbenetzung in der Zinkschmelze und letztlich die Zinkannahme auf der Stahloberfläche zu erreichen. Der Ablauf des Verfahrens der Stückverzinkung ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. [13]



**Abbildung 3** Schematische Darstellung des Verfahrens der Feuerverzinkung von Stückgut [14]

Das Feuerverzinken von Stückgut kann in zwei Temperaturbereichen der Normaltemperatur- (NT) Feuerverzinkung im Bereich um  $\vartheta = 450\text{ °C}$  und der Hochtemperatur- (HT) Feuerverzinkung im Bereich um  $\vartheta = 530\text{ bis }560\text{ °C}$  erfolgen. [15] Im Rahmen des Forschungsprojektes war für die Simulation des Montagebereichs des Stoßes eines Brückenträgers der geschraubten GV-Verbindungen eine Kombination beider Verfahren vorgesehen. Die für die Untersuchung an Kleinteilproben simulierten Hauptträger der Brücke sollten mit einer Normaltemperatur- (NT) Feuerverzinkung und die simulierten Laschenbleche des Stoßes der GV-Verbindung mit einer Hochtemperatur- (HT) Feuerverzinkung versehen werden.

Der Schichtaufbau einer NT-Feuerverzinkung ist meist aus mehreren deutlich erkennbaren Eisen-Zink-Legierungsschichten aufgebaut. Der klassische Aufbau des Zinküberzugs ist am Beispiel des Niedrigsilizium Stahls in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4** Aufbau eines Zinküberzugs auf Niedrigsilizium-Stahl durch Feuerverzinkung bei etwa 460°C [13]

Aufsteigend befinden sich auf der Stahloberfläche des Grundwerkstoffs Phasen mit der Bezeichnung  $\Gamma$  (gamma),  $\delta_1$  (delta eins),  $\zeta$  (zeta) und  $\eta$  (eta). Die  $\Gamma$ -Phase ist im Vergleich zu den anderen Phasen sehr dünn und meist kaum nachweisbar. Das Gefüge der  $\Gamma$ -Phase hat einen kubischen Gitteraufbau, die  $\delta_1$ -Phase besteht aus einem hexagonalen Kristallgitter und die  $\zeta$ -Phase ist monoklin. Den Abschluss bildet eine über den Fe-Zn-Phasen liegende Schicht aus Reinzink, beziehungsweise  $\eta$ -Phase (eta), die aus den Legierungselementen der Zinkschmelze besteht. Diese Reinzinkphase neigt zur Einebnung der Oberflächentopographie und zeigt im Vergleich mit den anderen intermetallischen Phasen eine geringere Härte.

Bei der HT-Feuerverzinkung entsteht eine durchlegierte harte Eisen-Zink-Legierungsphase ( $\delta_1$ -Phase) ohne abschließende Reinzinkphase ( $\eta$ -Phase). Dadurch wird eine hohe Oberflächenhärte mit verbesserten Abrieb- und Verschleißigenschaften als bei der NT-Feuerverzinkung erreicht. Aufgrund der geringen Neigung zur Oberflächeneinebnung durch die flüssige Zinkschmelze war zu erwarten, dass die vor der Stückverzinkung aufgeraute Oberfläche auch nach dem Prozess der Feuerverzinkung in ihrer rauen Oberflächenstruktur erhalten bleibt (siehe Abbildung 5).





**Abbildung 5** Beispiel einer mechanischen Reibflächenvorbereitung an einer Lasche mit nachträglicher HT-Verzinkung

Somit sind bei dieser Verfahrensweise die Vorteile der rauen Oberfläche im Hinblick auf die Haftreibung und die Vorteile des dauerhaften Korrosionsschutzes der Feuerverzinkung für den Stoßbereich der GV-Verbindung vereint. Außerdem ist aufgrund der geringeren Kriechneigung mit geringeren Verlusten der Vorspannkräfte zu rechnen. HT-Verzinken ist jedoch aufgrund der aktuell verfügbaren Verzinkungsanlagen zurzeit auf eine Bauteillänge von ca. 4,50 Metern begrenzt, wodurch größtmäßig nur untergeordnete Bauteile einer geschraubten Verbindung mit diesem Verfahren behandelt werden können. Allerdings sind Verbindungen von normaltemperaturverzinkten Fügepartnern als zu verbindende Stahlbauteile mit hochtemperaturverzinkten Laschen innerhalb der benötigten Abmessungen möglich und konnten damit grundlegend untersucht und für den Bau feuerverzinkter Stahl- und Verbundbrücken optimiert werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein im Stahlbau üblicher Stahl mit einem Siliziumgehalt im Bereich des Sebesty-Stahls verwendet. Als Alternative wurde ein Hochsilizium-Stahl untersucht.



## Grundlagen zur GV-Verbindung

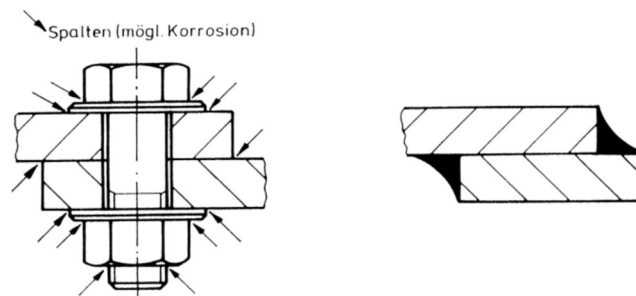
Maßgebliche Einflussfaktoren auf die Belastbarkeit von gleitfest vorgespannten Verbindungen sind die Vorspannkraft der Schraubenverbindung und der Haftreibwert des zu verbindenden Materials. Vor allem hochfest vorgespannte Schraubenverbindungen (HV-) werden aufgrund der höheren Belastbarkeit verwendet.

Das für die Ausführung von Stahltragwerken in Europa zugrundeliegende Regelwerk DIN EN 1090-2 unterscheidet die Kontaktflächen von GV-Verbindungen in vier unterschiedliche Reibflächenklassen A bis D für die entsprechenden Vorbehandlungen der Oberflächen der Bauteile definiert werden (siehe Tabelle 1). Die definierten Oberflächenbehandlungen lassen die Zuordnung zu einer Haftreibungszahl  $\mu$  zu, der in der ausgelegten GV-Verbindung jederzeit zuverlässig erreicht werden muss. Für Oberflächen die von den aufgeführten Oberflächenbehandlungen abweichen, ist ein Prüfverfahren nach Anhang G nötig, um die Haftreibungszahl  $\mu$  zu ermitteln. Für eine reine Feuerverzinkung gibt es keine Einstufung in eine Reibflächenklasse.

**Tabelle 1** Auszug aus DIN EN 1090-2: Reibflächenklassen und Oberflächenbehandlungen [7]

Reibflächenklasse	Haftreibungszahl $\mu$	Oberflächenbehandlung
A	0,5	Oberflächen mit Kugeln oder mit kantigem Strahlmittel gestrahlt, loser Rost entfernt, nicht körnig.
B	0,4	Oberflächen mit Kugeln oder mit kantigem Strahlmittel gestrahlt oder Oberflächen feuerverzinkt und sweepgestrahlt plus Alkali-Zink-Silikat-Beschichtung mit einer Nenndicke von 60 $\mu\text{m}$
C	0,35	Oberflächen feuerverzinkt und sweepgestrahlt
C	0,3	Oberflächen mittels Drahtbürsten oder Flammstrahlen gereinigt, loser Rost entfernt
D	0,2	Oberflächen im Walzzustand

Bei GV-Schraubenverbindungen ist der Lochdurchmesser (abhängig vom Schraubendurchmesser) 2-3 mm größer als der Durchmesser des Schraubenschafts. Der dadurch entstehende Hohlraum stellt für das Korrosionsschutzsystem bei unzureichender Abdichtung eine höher beanspruchte Stelle dar, da die darin eintretende Feuchtigkeit mangels Luftaustausch nicht zügig zurücktrocknen und damit ein Mikroklima bilden kann. Neben den durch Lochspiel vorhandenen Hohlräumen an den Schraubenlöchern stellen die äußeren Fugen einer geschraubten feuerverzinkten Laschenverbindung und die Spalte des Stoßes eine weitere potentielle Schwachstelle im Korrosionsschutzsystem dar. Der evtl. Einsatz von Tausalzen an Verkehrswegebrücken fördert die korrosive Belastung zusätzlich. Bei Anwendung organischer Beschichtung als Korrosionsschutzsystem müssen diese Schwachstellen daher gemäß DIN EN ISO 12944-3 [16] und ZTV-ING Teil 4 Abschnitt 3 [3] durch geeignete Dichtstoffe geschlossen werden (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 6** Korrosionsgefährdete Schwachstellen (links) und Dichtstoffe in Fuge (rechts) [17]

Für Zinküberzüge fehlten derartige Vorgaben für den Einsatz im Stahl- und Verbundbrückenbau insbesondere unter Tausalzeinfluss. 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. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Lösung für den Korrosionsschutz der Fugen und Spalte des geschraubten Montagestoßes durch Abdichten mit Dichtstoffen erarbeitet.

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) [18] durch die Einordnung der Brückenkonstruktion und der konstruktiven Details in Kerbfälle. Für geschraubte Verbindungen im Stahl- und Brückenbau sind nach EC3-1-9 die in Tabelle 2 dargestellten Kerbdetails bedeutsam. Für zyklische Beanspruchungen ist die GV-Verbindung besonders vorteilhaft, da die Kräfte über die durch Vorspannung erzeugte Reibfläche übertragen werden und dadurch keine nennenswerten Spannungsschwingbreiten in den Schrauben resultieren.

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

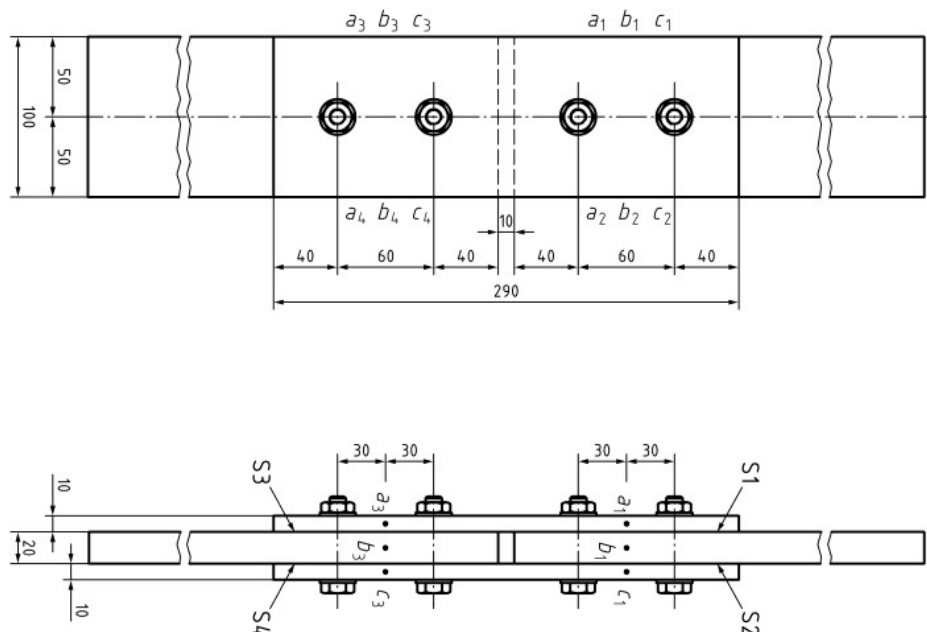
Kerbfall 112	Kerbfall 90	Kerbfall ?
Zweischnittige Verbindung mit vorgespannten Schrauben	Passschrauben mit Scher-Lochleibungs-Beanspruchung	GV-Verbindung unter zyklischer Beanspruchung mit Vorspannkraftverlusten

Die Kerbfälle gelten bisher nur für unverzinkte Konstruktionen und konnten bisher nicht auf feuerverzinkte Bauteile angewendet werden. Umfassende, wissenschaftliche Untersuchungen zu ermüdungsbeanspruchten GV-Verbindungen von feuerverzinkten Stahlbauteilen fehlten. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine günstige Kombination der Parameter entwickelt, die sowohl eine möglichst hohe Dauerfestigkeit und gleichzeitig eine wirtschaftliche Herstellung sicherstellt.

## Durchgeführte Untersuchungen

### 1. Untersuchungen zur Haftreibwertermittlung

Die Hauptparameter bei der GV-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 Untersuchung sind die Probengeometrien gemäß dieser Norm (Abbildung 7) vorgeschrieben. Der Versuchsaufbau besteht aus zwei verzinkten Stahl-Fügepartnern (S355J2+N,  $t=20\text{mm}$ ), die über zwei verzinkte Stahl-Laschen (S355J2+N,  $t=10\text{mm}$ ) verschraubt (M20 10.9 HV) werden. Die Kraftübertragung erfolgte während des Versuchsablaufs ausschließlich reibkraftschlüssig über die zuvor aufgebraachte Vorspannkraft.



**Abbildung 7** Prüfkörperabmessung in mm mit Schrauben M20, 10.9 in Löchern mit  $d_0 = 22\text{mm}$  [7]

Ziel der Untersuchungen war es, durch unterschiedliche Oberflächenbearbeitungen eine möglichst hohe Haftreibungszahl  $\mu$  zu erhalten bei gleichzeitig moderatem Bearbeitungsaufwand. Zusätzlich wurde der Einfluss der Zinküberzugsdicke und einer oberflächlichen Korrosion auf die Haftreibungszahl  $\mu$  untersucht. Es wurden 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. Alle Parameter sind in Tabelle 3 angegeben.

**Tabelle 3** Überzugsdickenmessung

Bauteil	Bearbeitung	Siliziumgehalt	Tauchdauer	Überzugsdicke
Zugstab HSi1	HochSilizium – NTV	0,334 %	7,5 min	270 - 320 µm
Zugstab HSi2	HochSilizium – NTV	0,334 %	10 min	500 - 620 µm
Zugstab HSi3	HochSilizium – NTV	0,334 %	12,5 min	600 - 650 µm
Zugstab Seb1	Sebisty – NTV	0,224 %	10 min	370 - 400 µm
Zugstab Seb2	Sebisty – NTV	0,224 %	25 min	450 - 500 µm
Zugstab Seb3	Sebisty – NTV	0,224 %	40 min	540 - 630 µm
Lasche	gestrahlt, HTV	0,224 %	5 min	120 - 150 µm
Lasche	NTV, gefräst	0,224 %	10 min	480 - 520 µm

Im Bereich der Reibflächen der Fügepartner wurden unterschiedliche Oberflächenbearbeitungen durchgeführt. Diese wurden vor oder nach dem Verzinken durchgeführt, dies war abhängig von der für das Bauteil gewählten Verzinkungstemperatur und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 4 angegeben. Abbildung 7 zeigt die zwei favorisierten Oberflächenbearbeitungen.

**Tabelle 4** Serie 1 Quasi-statische Prüfungen an Standardproben nach EN 1090-2, Anhang G mit gemischten Oberflächen

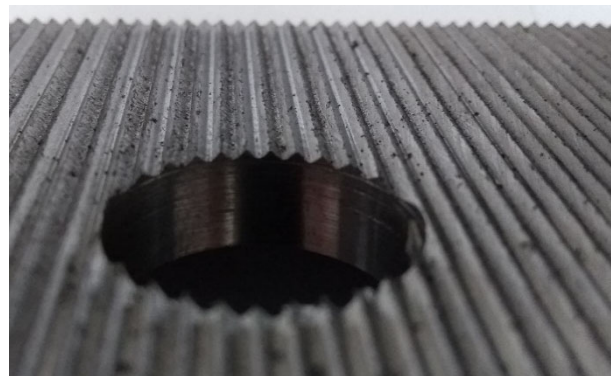
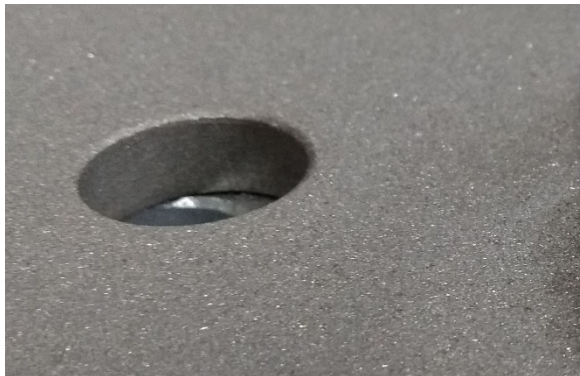
GV-Schraubverbindung zwischen		Lasche mit Oberflächenvorbereitung vor HT-Verzinkung			Lasche mit Oberflächenvorbereitung nach NT-Verzinkung	
	Stahl / Zinkoberfläche	natürliche Zinkoberfläche (Konf. A)	Strahlen (Konf. B)	Fräsen (Konf. C)	natürliche Zinkoberfläche (Konf. D)	Fräsen (Konf. E)
<b>Fügepartner mit NT-Verzinkung</b>	Sebistystahl natürliche 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 natürliche Zinkoberfläche (Konfiguration 3)	5 (1)	4 (-)	4 (-)	4 (-)	4 (-)

**Tabelle 5** Serie 1 Quasi-statische Prüfungen an Standardproben nach EN 1090-2, Anhang G mit Oberflächen nach EN 1090-2, Tab. 17

GV-Schraubverbindung zwischen		Lasche mit Oberflächenvorbereitung nach NT-Verzinkung	
Fügepartner mit NT-Verzinkung	Stahl / Zinkoberfläche	Gesweeppte Zinkoberfläche	Gesweeppte und ASI-Beschichtete Zinkoberfläche
	Sebistystahl <b>gesweeppte</b> Zinkoberfläche	4 (-)	-
	Sebistystahl <b>gesweeppte und ASI-Beschichtete</b> Zinkoberfläche	-	4 (-)

**Tabelle 6** Serie 2 Quasi-statische Prüfungen an Standardproben nach EN 1090-2, Anhang G, unter besonderer Berücksichtigung von Zinküberzugsdicken und Vorspannkraftverlusten

GV-Schraubverbindung zwischen		Lasche mit Oberflächenvorbereitung vor HT-Verzinkung	
Fügepartner mit NT-Verzinkung und optimaler Nachbehandlung aus AP2.1	Stahl / Zinkoberfläche	Optimum 1 aus AP2.1 NT-Verzinkung, fräsen	Optimum 2 aus AP2.1 Strahlen, HT-Verzinkung
	Sebistystahl <b>3 Zinküberzugsdicken</b> 370 - 400 µm 450 - 500 µm 540 - 630 µm	3 x 5 = 15 (davon 3 Kriechversuch)	3 x 5 = 15 (3)
	Hochsiliziumstahl <b>3 Zinküberzugsdicken</b> 270 - 320 µm 500 - 620 µm 600 - 650 µm	3 x 5 = 15 (3)	3 x 5 = 15 (3)



**Abbildung 8** Gestrahlte Oberfläche (links) und gefräste Zahnstruktur an der Oberfläche (rechts)

Zur Durchführung der quasi-statischen Prüfungen und Kriechprüfungen wurden die Probekörper in einer Universalprüfmaschine belastet. An den vorgegebenen Stellen (DIN EN 1090-2, Anhang G) des Prüfkörpers wurden die Relativverschiebungen mittels induktiver Wegaufnehmer gemessen. Um die eingebrachten Vorspannkkräfte direkt zu messen wurden instrumentierte Schrauben verwendet. Hierfür wurden Dehnungsmessstreifen mittig im Schaft in die verwendeten Schrauben appliziert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 9 dargestellt.



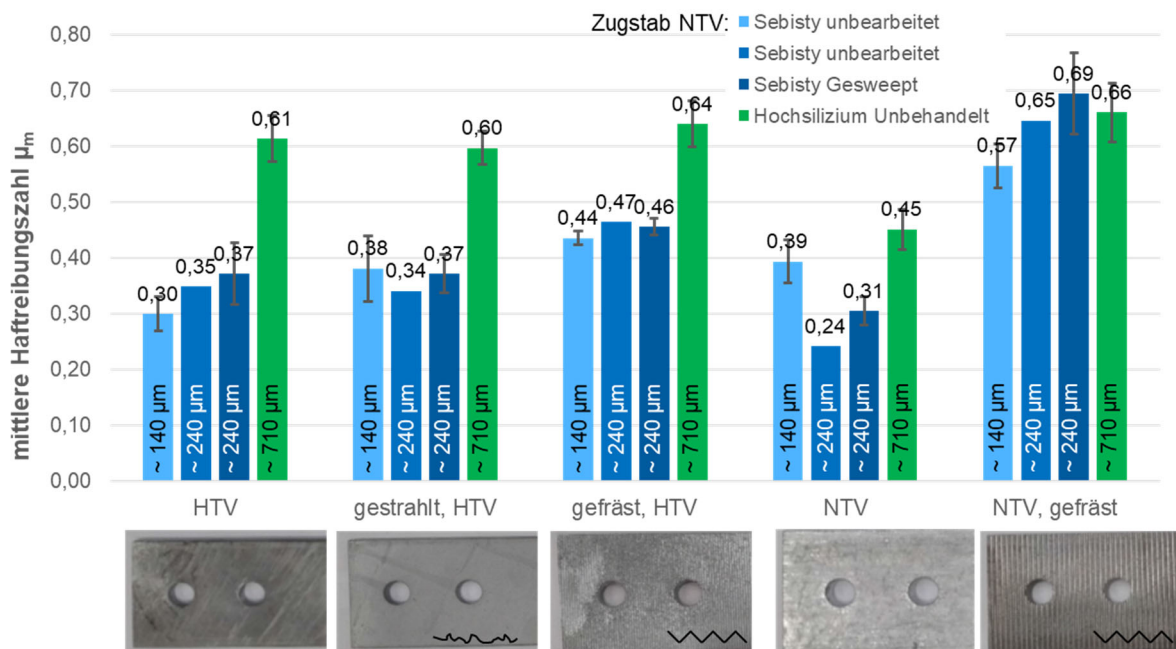
**Abbildung 9** Versuchsaufbau der quasi-statischen Prüfung inkl. Messinstrumente

Die quasi-statischen Prüfungen wurden weggesteuert durchgeführt. Die Geschwindigkeit (0,003 mm/s) wurde so gewählt, dass die Vorgabe der Prüfdauer von 10-15 Minuten eingehalten wurde [7]. In allen Fällen wurde ein Gleitversagen beider Verbindungen eines Prüfkörpers abgewartet. Auch nach dem Versagen wurden die Prüfungen bis zu einem Erreichen von Gleitwegen bis 2 mm weitergeführt.

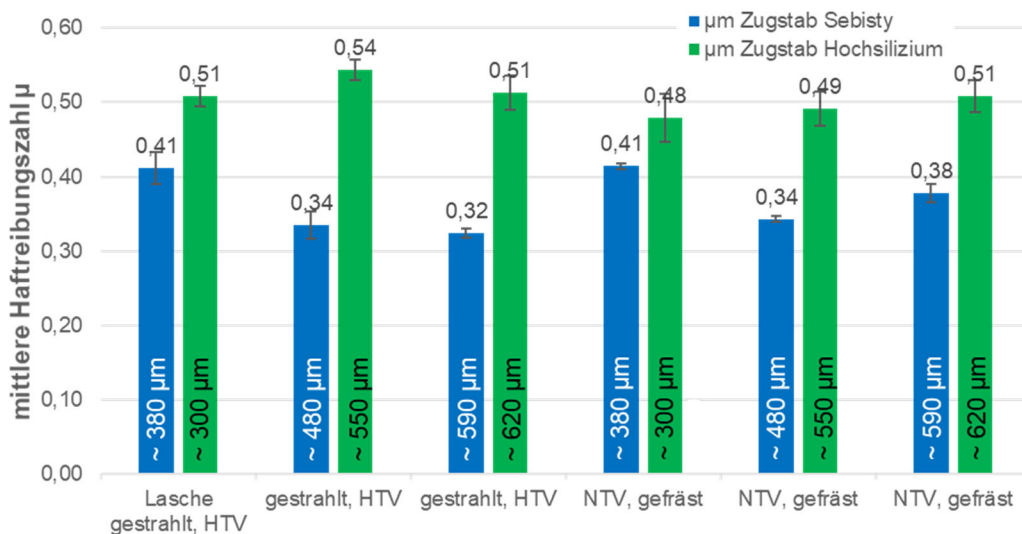
Während der Versuche wurden die Kraft, die Verschiebung und die Gleitwege an acht Stellen, sowie die Vorspannkraft aller Schrauben gemessen.

Die ermittelten Haftreibungswerte  $\mu_m$  liegen für die unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen und Zinküberzüge zwischen 0,30 und 0,57. Eine Übersicht über alle Ergebnisse ist in den Abbildung 10 und 11 dargestellt.





**Abbildung 10** Ergebnisse der quasi-statischen Prüfungen, Serie 1



**Abbildung 11** Ergebnisse der quasi-statischen Prüfungen, Serie 2 Überzugsdickeneinfluss

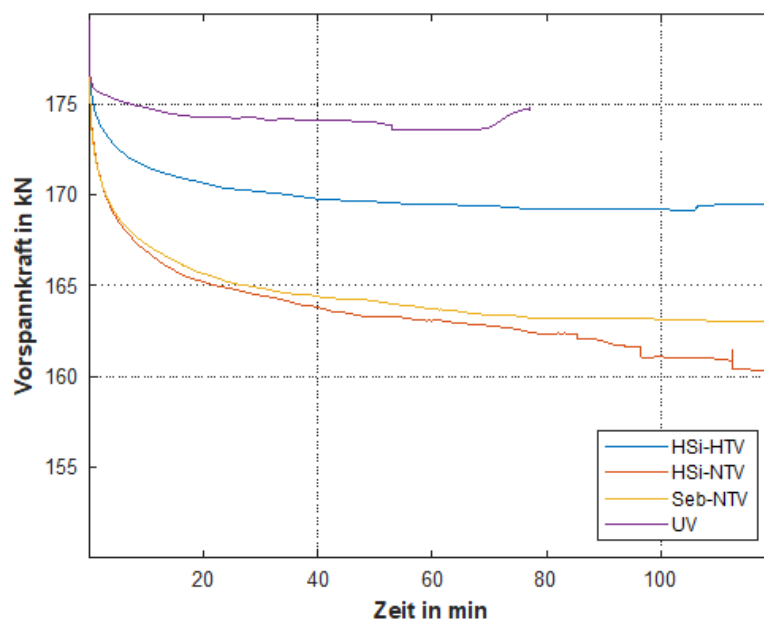
Die große Anzahl an quasi-statischen Prüfungen von Verbindungen mit unterschiedlichen Oberflächen von Zugstab und Laschen gab die Möglichkeit die erzielten Ergebnisse unter verschiedenen Gesichtspunkten zu analysieren. Beim Vergleich der quasi-statischen Prüfungen untereinander lassen sich Einflüsse aufgrund der Beschaffenheit bzw. Rauigkeit der Oberfläche erkennen. Die Verbindungen mit gefrästen Laschen zeigen deutlich höhere Haftreibungszahlen  $\mu$ . Die „grobe“ Struktur der gefrästen Oberfläche scheint über das Einpressen in die Oberfläche des Fügepartners eine hohe quasi-statische Tragfähigkeit zu generieren. Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Grundwerkstoffe und Verzinkungstemperaturen ließen sich unterschiedliche Einflüsse

auf die Haftreibungszahl erkennen. Die Eisen-Zink-Legierungsphase besitzt eine höhere Härte als eine oberflächige Reinzinkschicht.

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. Die geringste Reduktion durch Kriechen zeigte die Verbindung, die nur einseitig eine oberflächliche Reinzinkschicht besaß (Konfiguration 1 & B). Aber auch bei dieser Verbindung mit unterschiedlichen Oberflächen des Zugstabs 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, was auch 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 in Abbildung 12. In orange und gelb die NT-verzinkten und nachträglich gefrästen Varianten, die deutlich unterhalb der gestrahlten und HT-verzinkten Variante liegt. Die Differenz sind ca. 6 %. Alle feuerverzinkten Verbindungen haben einen stärkeren Vorspannkraftabfall als die untersuchte unverzinkte GV-Verbindung.



**Abbildung 12** Vorspannkraft-Zeit-Diagramm der Versuchsreihen aus Serie 2

Der höhere Vorspannkraftverlust bei den feuerverzinkten GV-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. Danach wurde die Verbindung direkt in die Prüfmaschine eingebaut und der Versuch gestartet. In Tabelle 7 sind die Vorspannkraftverluste über die Versuchsdauer der Versuchsreihe gegenübergestellt.

**Tabelle 7** Vorspannkraftverluste der quasi-statischen Prüfung

<b>Bezeichnung der Verzinkung Zugstab</b>	<b>Lasche ge- strahlt, HTV</b>	<b>Lasche NTV, Rillen gefräst</b>
	<b>Vorspannkraft- verlust [%]</b>	<b>Vorspannkraft- verlust [%]</b>
<b>HSi_1</b>	8,10	19,496
<b>HSi_2</b>	7,81	17,360
<b>HSi_3</b>	6,09	17,208
<b>Seb_1</b>	5,48	14,528
<b>Seb_2</b>	4,12	11,143
<b>Seb_3</b>	4,19	14,570

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 Bauwerks von 100 Jahren durchgeführt werden. Alle untersuchten Oberflächen prognostizierten verbleibende Vorspannkraft bei einer Lebensdauer des jeweiligen Bauwerks über 90 %.

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

## **2. Untersuchungen zur 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 (Verformungskriterium). In diesem Fall kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass in der GV-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 mit einem R-Verhältnis von 0,1. Die maximale Spannungsschwingbreite lag bei 124 N/mm<sup>2</sup>.

Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 8 dargestellt.

**Tabelle 8** Versuchsprogramm GV-Verbindungen unter zyklischer Beanspruchung

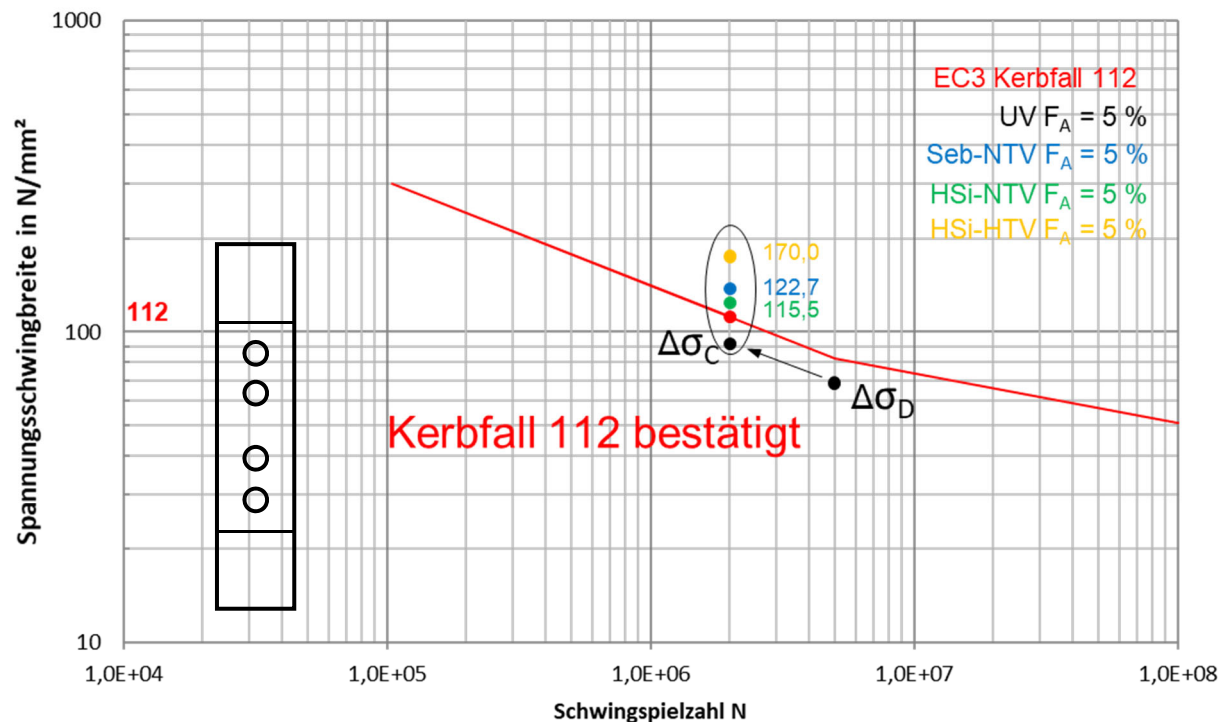
Serie 1 GV-Verbindungen mit Variation Zinküberzugsdicken und Oberflächenvorbereitung

GV-Schraubverbindung zwischen		Lasche mit Oberflächenvorbereitung vor / nach Verzinkung		
	Stahl/ Zinkoberfläche	<u>Konfiguration B</u> Gestrahlt & HTV	<u>Gleitklasse C</u> NTV & Gesweept (250 µm)	<u>Gleitklasse B</u> NTV, Gesweept & ASI (250 µm)
Fügepartner mit NT-Verzinkung	<u>Konfiguration 1</u> Sebistystahl unbearbeitet (250 & 500 µm)	✓	-	-
	<u>Gleitklasse C</u> Sebistystahl Gesweept (250 µm)	-	✓	-
	<u>Gleitklasse B</u> Sebistystahl Gesweept & ASI (250 µm)	-	-	✓

Serie 2 Variation GV- und SLP-Verbindungen, unverzinkt oder NT-verzinkt

GV-Schraubverbindung zwischen		Lasche mit / ohne Oberflächenvorbereitung		
	Stahl/ Verzinkung	unverzinkt	NT-verzinkt	HT-verzinkt
Fügepartner mit NT-Verzinkung	Sebistystahl unverzinkt	✓ (REF 1)	-	-
	Sebistystahl NT-Verzinkung	-	✓	-
	Hochsiliziumstahl NT-Verzinkung	-	✓	-
	Hochsiliziumstahl NT-Verzinkung	-	-	✓
SLP-Schraubverbindung zwischen		Lasche		
	Material Stahl/ Verzinkung	NT-verzinkt		
Fügepartner	Sebistystahl NT-Verzinkung	✓ (REF 2)		

Die Ergebnisse der unterschiedlichen, feuerverzinkten Versuchsreihen liegen oberhalb der Wöhlerlinie des Kerbfalls 112 (siehe Abbildung 13), daher kann der Kerbfall auch für feuerverzinkte Bauteile bestätigt werden. Eine Abminderung muss nicht stattfinden.



**Abbildung 13** Wöhlerdiagramm zu Kerbfall 112, GV-Verbindung mit Versuchsergebnissen der feuerverzinkten Probekörper

In keiner der durchgeführten Untersuchungen trat ein Ermüdungsversagen des Werkstoffs auf, ebenso versagte die Reibfläche bei den untersuchten Lasten nicht. 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 erfolgte eine weitere Überprüfung der Ergebnisse aus den Kleinteilversuchen an brückenbautypischen, feuerverzinkten Stahlträgern (HEB 340, S355). Es wurden insgesamt vier Versuche geplant, der Versuchsaufbau ist in Abbildung 14 dargestellt. 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 und 163 N/mm².





**Abbildung 14** Aufbau zur Untersuchung von brückenbautypischen, feuerverzinkten Trägern mit GV-Verbindungen

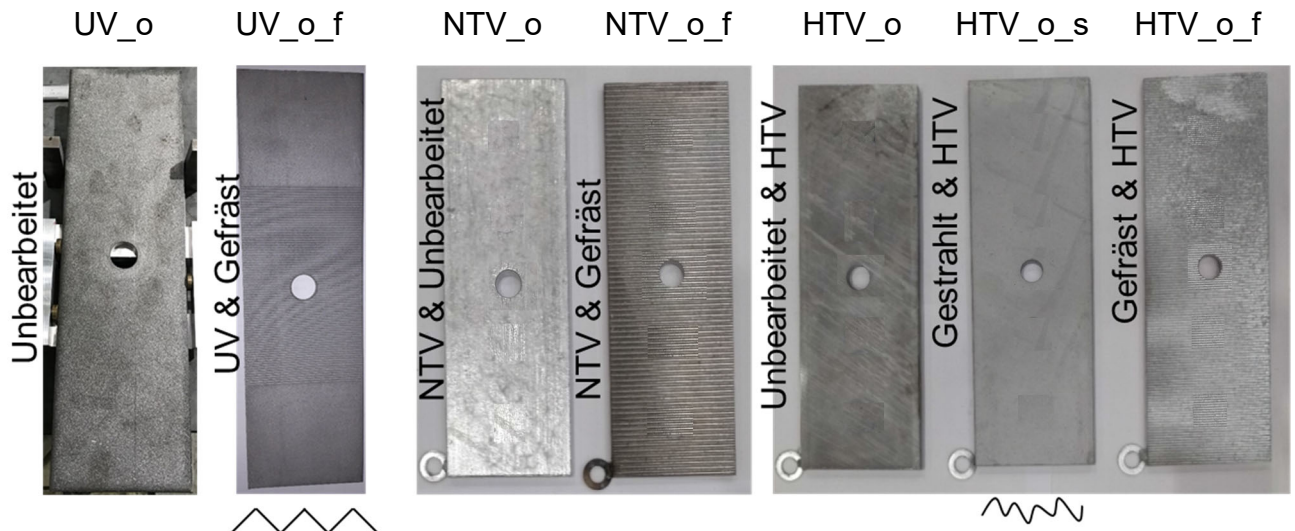
Die untersuchten Oberflächen sind tragfähiger als diejenigen, die an den Kleinteilproben getestet wurden. Ein anderer Aufbau des Zinküberzugs ließ sich an den Trägern feststellen. Diese zeigten trotz gleicher chemischer Zusammensetzung des Grundmaterials, eine durchgewachsene Eisen-Zink-Legierungsschicht. Vergleicht man die Ergebnisse mit weiteren aus der Literatur [19, 20] so ordnen sich die Werte auch dort oberhalb des Kerbfalls 112 ein und kann weiterhin bestätigt werden.

Für gelochte Stahlbleche muss nach DIN EN 1993-1-9 [18] ein zusätzlicher Nachweis geführt werden. Der Kerbfall für diese Bleche ist der Kerbfall 90. Die verschiedenen Oberflächenvorbereitungen (Tabelle 9) wurden überprüft. Als Kerbstelle wird ein mittiges Loch, in der Größe der untersuchten GV-Verbindungen gewählt. Abbildung 15 zeigt die untersuchten Oberflächen.

**Tabelle 9** Ermüdungsfestigkeit unverzinkter und HT-verzinkter, gelochter Bleche

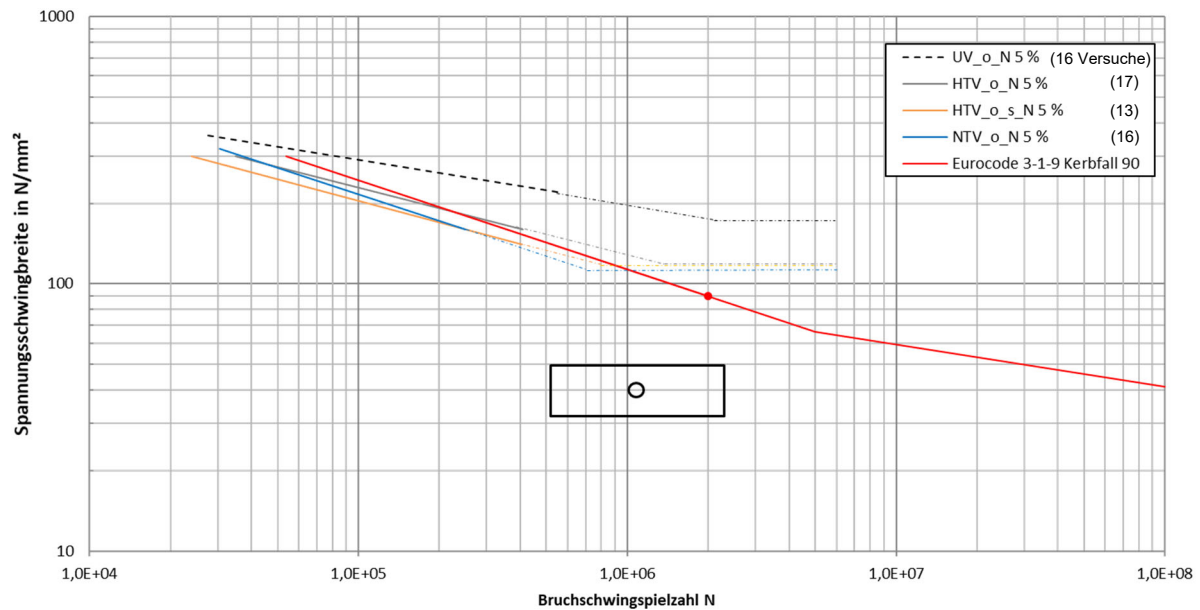
Gelochte Lasche 340 x 100 x 10 mm						
unverzinkt		Oberflächenvorbereitung nach NT-Verzinkung		Oberflächenvorbereitung vor HT-Verzinkung		
keine	fräsen	keine	fräsen	keine	strahlen	fräsen

Bezeichnung der Versuchsreihe:

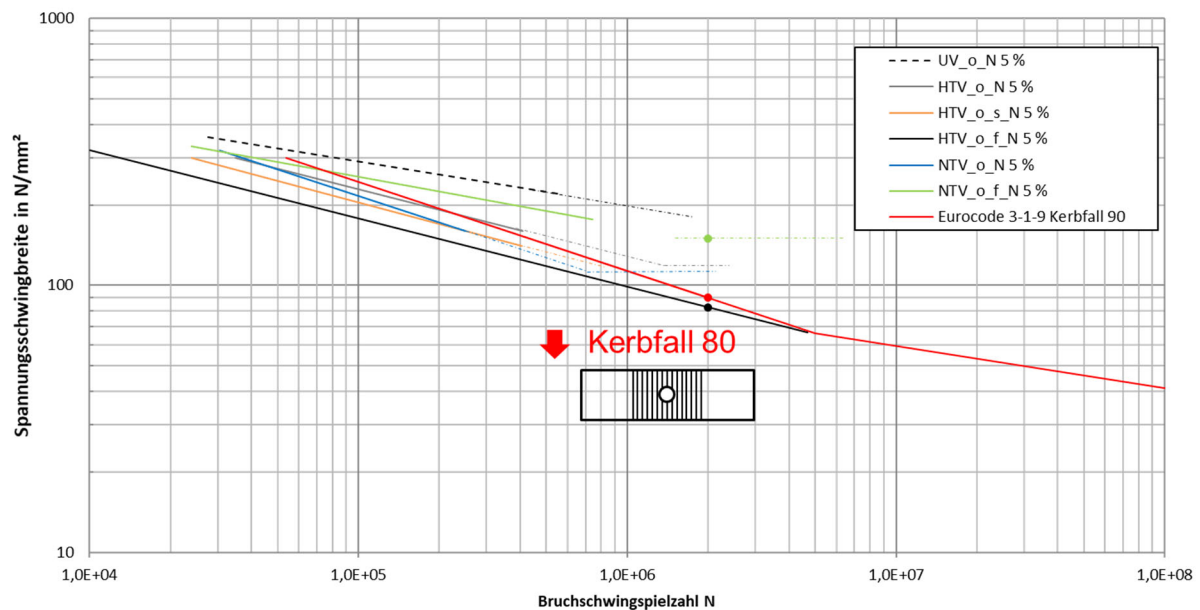


**Abbildung 15** Darstellung der Oberflächen der untersuchten Blechproben

Die Ermüdungsversuche wurden in einer servohydraulischen Prüfmaschine geprüft. Die Prüfung erfolgte unter zyklischer Belastung zugschwellend bei einem R-Verhältnis von 0,1. Die Ergebnisse liegen im 5 % Quantil noch höher als die Bemessungswöhlerlinie für den entsprechenden Kerbfall 90 (Abbildung 16). Der Kerbfall 90 kann für die gestrahlten Oberflächenvorbehandlungen bestätigt werden. Der Einfluss aus unterschiedlichen Blechdicken kann aus Vorversuchen ausgeschlossen werden.



**Abbildung 16** Wöhlerdiagramm zu Kerbfall 90, gelochtes Blech unverzinkt und feuerverzinkt



**Abbildung 17** Wöhlerdiagramm zu Kerbfall 90, gelochtes und mit gefrästen Rillen versehenes Blech, unverzinkt und feuerverzinkt

Werden schärfere Oberflächenbearbeitungen, wie die gefrästen Rillen vor oder nach der Feuerverzinkung in das Bauteil eingebracht, so sieht man an den Ergebnissen in Abbildung 17, dass der Kerbfall nicht mehr bestätigt werden kann. Hier muss um einen Kerbfall, auf Kerbfall 80, abgemindert werden.



### 3. Untersuchungen zur Abdichtung der Fugen und Spalte

Im Forschungsprojekt war für die Spalte des Stoßes und die an den Kontaktflächen einer GV-Verbindung aus verzinkten Blechen entstehende Fuge der Korrosionsschutz durch die Entwicklung einer Anwendung von Dichtstoffen zu verbessern.

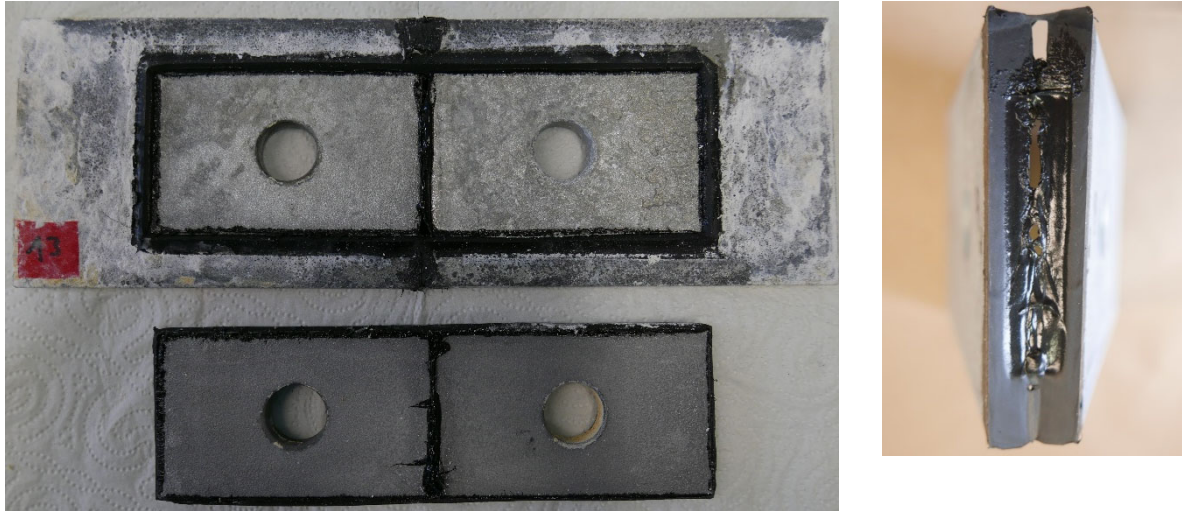
Für die grundlegende Eignungsuntersuchung wurden acht Dichtstoffe auf Hochtemperatur (HT) und Normaltemperatur (NT) verzinkten Blechen appliziert und im Raupenschälversuch gemäß DIN 54457 [21] geprüft. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Dichtstoffe nicht ohne die Anwendung eines haftvermittelnden Primers appliziert werden sollten. Nur mittels Primer werden an den Klebverbindungen Kohäsionsbrüche gemäß DIN EN ISO 10365 in akzeptablem Ausmaß auf HT- und NT- verzinkten Blechen festgestellt, siehe Abbildung 18.



**Abbildung 18:** Bruchbilder der Dichtstoffe auf NT-Verzinkung nach AHT-Belastung links: Teroson MS 640, Mitte: Otto Coll P83, rechts: Sikaflex 11 FC

Für die Auswahl geeigneter Dichtstoffe zur Anwendung an der praxisrelevanten Fügeverbindung, wurde eine Nutzwertanalyse der untersuchten Polyurethan- und MS-Polymer-Dichtstoffe anhand der Ergebnisse aus Verarbeitbarkeit, Verhalten bei künstlicher UVA-Belastung gemäß DIN EN ISO 4892-3 Verfahren A [22] und Bruchbild im Raupenschälversuch nach einwöchiger Laborbelastung „Beregnung“ in Anlehnung an DIN EN ISO 6270-2 AHT [23] erarbeitet. Nach der Auswertung der Nutzwertanalyse wurden die drei Dichtstoffe Teroson MS 640, Otto Coll P83 und Sikaflex 11 FC (MS-DS1, PUR-DS4 und PUR-DS7) für die Anwendung an den praxisrelevanten gefügten Probekörpern festgelegt. Als Primer wurden Teroson SB 450, Cleanprimer 1226 und Haftreiniger 1/Primer-3 N für die Versuche an gefügten Verbindungen angewendet.

Die verwendeten Primer bestehen hauptsächlich aus Isopropanol, das bei unzureichender Rücktrocknung die Vernetzung von PUR-Dichtstoffen durch Konkurrenzreaktion mit dem Isocyanat stört. Die Folge einer Primeranwendung an einer Fügeverbindung mit unzureichender Rücktrocknung ist, dass der PUR-Dichtstoff an der Fuge pastös bleibt und nicht aushärten kann, siehe exemplarisch Abbildung 19.



**Abbildung 19:** Demontierter Probekörper mit Dichtstoffweichung in der Fuge und im Spalt

Zur Lösung dieses Problems wurde eine spezielle Applikationstechnologie für den Primer mit einem fusselfreien Tuch erarbeitet, um das Eindringen des Primers in die Fuge und damit die Konkurrenzreaktion mit dem PUR-Dichtstoff zu vermeiden. Der MS-Dichtstoff 1 zeigte die für die PUR-Dichtstoffe 4 und 7 festgestellte Konkurrenzreaktion an der Fuge in Verbindungen mit dem verwendeten Primer nicht. In Tabelle 10 ist die für die Fügeverbindung erarbeitete Applikationstechnologie der Primer zusammengestellt.

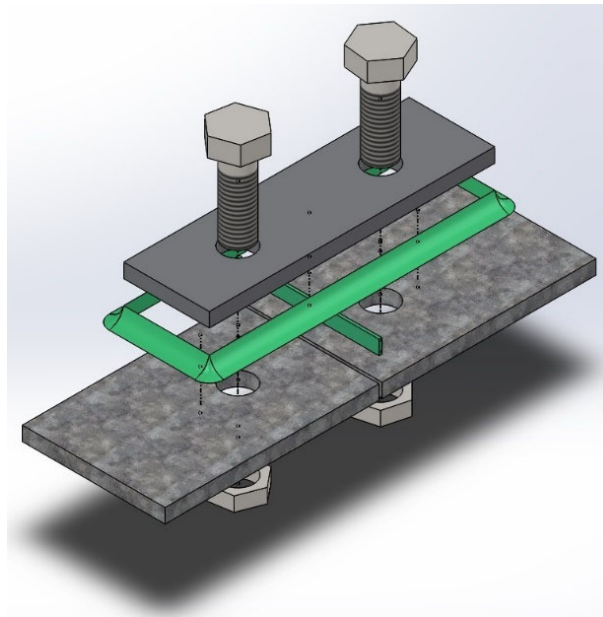
**Tabelle 10:** Erarbeitete Anwendung der Primer für die Fügeverbindung

Primer	Applikation, Eigenschaft	Abluftzeit
Teroson SB 450	mit Stofftuch auftragen, hinterlässt Film	10 – 60 min
Cleanprimer 1226	mit Stofftuch sehr dünn auftragen	15 min
Sika Haftreiniger 1 Sika Primer-3 N	Beides mit Stofftuch sehr dünn auftragen	15 min 30 min

Für die Untersuchungen zur Schutzdauerprognose, der drei gewählten Dichtstoffe, für den Fugebereich von GV-Verbindungen aus verzinktem Stahlblech wurden zwei Oberflächenkombinationen gemeinsam mit dem pbA favorisiert. Für die Versuche an gegügten Probekörpern wurden die Oberflächenkombinationen:

1. Grundplatte normaltemperaturverzinkt natürliche Zinkoberfläche gefügt mit Lasche hochtemperaturverzinkt natürliche Zinkoberfläche und
2. Grundplatte normaltemperaturverzinkt natürliche Zinkoberfläche gefügt mit Lasche normaltemperaturverzinkt Zinkoberfläche nachträglich durch Fräsen einer Sägezahnstruktur entfernt

festgelegt. In Abbildung 20 ist eine Explosionszeichnung der Fügeverbindung inklusive der vorgesehenen Dichtstoffraupen dargestellt.



**Abbildung 20:** Explosionszeichnung der Fügeverbindung mit Dichtstoff

Im Bereich der Fuge war die Applikation des Dichtstoffs als Kehlnaht und im Bereich des Stoßes die Applikation als I-Naht vorgesehen. Die für die vollständige Schraubengarnitur notwendigen Unterlegscheiben sind in der Explosionszeichnung nicht dargestellt. Hergestellt wurden die für die Untersuchungen speziell entwickelten Probekörper als GV-Verbindungen mit HV Schraubengarnituren der Bezeichnung M20x50-10.9-tZn unter Verwendung des kombinierten Vorspannverfahren gemäß DIN EN 1090-2 mit einem Drehmoment von  $M = 322 \text{ Nm}$  und einem weiter Drehwinkel von  $60^\circ$ .

Die im Labor an diesen gefügten Probekörpern durchgeführten Belastungsverfahren „Beregnung“, als praxisrelevanter Kondenswasser-Wechselklima-Test in Anlehnung an DIN EN ISO 6270-2 AHT [23], VDA 233-102 [24] und VDA 621-415 [25] erzeugten bei höher konzentrierter Salzeinwirkung einen zunehmenden flächigen Korrosionsangriff des Feuerzinküberzugs. Bei der Oberflächenkombination 1 mit HT-verzinkten Laschenplatten und NT-verzinkten Zugstabplatten ist der Korrosionsangriff nach den Laborbelastungen VDA 233-102 [24] und VDA 621-415 [25] ohne Dichtstoffanwendung auch in der Fuge der GV-Verbindung stark ausgeprägt. Die verwendeten Dichtstoffe sind daher im praktischen Einsatz zur Verringerung von Korrosion in der Fuge der Oberflächenkombination 1 bei einer Belastung im Einflussbereich von Tausalzen unumgänglich. Die Oberflächenkombination 2 mit NT-verzinkten und nachträglich gefrästen Laschenplatten und NT-verzinkten Zugstabplatten zeigte nach allen drei Laborbelastungsverfahren starke Korrosion in der Fuge. Bei der Oberflächenkombination 2 ist der Einsatz der Dichtstoffe daher unabhängig von den praktischen Einsatzbedingungen zur Verringerung von Korrosion in der Fuge der GV-Verbindung notwendig.

Nach der Laborbelastung „Beregnung“ der Oberflächenkombination 1 ist die Korrosion ohne die Dichtstoffanwendung in der Fuge der GV-Verbindung nur sehr schwach ausgeprägt und von der Flächenkorrosion kaum zu unterscheiden, wodurch der Einsatz



eines Dichtstoffes im Einflussbereich einer natürlichen Belastung ohne Salzeinfluss nicht notwendig erscheint, aber auch hier kann eine Dichtstoffanwendung das Korrosionsverhalten in der Fuge verbessern.

Die verwendeten Schraubengarnituren lassen den Zutritt des Elektrolyten in die Fuge trotz Verarbeitung gemäß DIN EN 1090 – 2 über die Gewindegänge zwischen Mutter und Schraube (spiralförmige Kapillare) zu. Dies ist an der Korrosion der Gewindesteigungen der Schraube und der kreisrunden Korrosionserscheinung in der Fuge um die Bohrungen erkennbar. Die im REM-EDX untersuchten Korrosionserscheinungen in der Fuge der laborbelasteten Probekörper stammen von Zinkoxiden/-hydroxiden die durch Zutritt des Elektrolyten über die Kapillare zwischen Schraube und Mutter entstehen und eine abnehmende Chlorid Konzentration von salzhaltiger Laborbelastung zu salzfreier Laborbelastung zeigen.

An den GV-Verbindungen mit dem Dichtstoff PUR-DS7 wurde in der Fuge unabhängig von der Laborbelastung immer wieder stärkere oder dunklere Korrosion mit Verfärbungen festgestellt, die allerdings nicht mit dem alleinigen Medienzutritt über die Gewindesteigungen der Fügeelemente begründet werden kann und auf das zusätzliche punktuelle Versagen der Abdichtung des Dichtstoffes PUR-DS7 zurückgeführt wird.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen ergaben mit zunehmender Salzeinwirkung der Laborbelastungen stärkere Bondline-Corrosion am Rand der Dichtstoffraupen durch die korrosive Unterwanderung des Zinküberzugs. Die Dichtstoffraupen waren im Querschliff an der untersuchten Kleblinie aber auch nach 6 Zyklen Laborbelastung gemäß VDA 621-415 noch intakt.

Zur Prüfung des Korrosionsschutzwirkung der an den Fugen und Spalten applizierten Dichtstoffe der gefügten feuerverzinkten GV-Verbindung unter dem Einfluss natürlicher Bewitterung wurden Freibewitterungsversuche durchgeführt. Für die Freibewitterung wurden folgende Belastungen festgelegt:

1. ein Jahr Freibewitterung in Stadtatmosphäre Dresden, Korrosivitätskategorie: C2
2. ein Jahr forcierte Freibewitterung gemäß VDA 621-414:02/1982 [26] durch wöchentliches besprühen mit NaCl Salzlösung der Konzentration 30 g/l





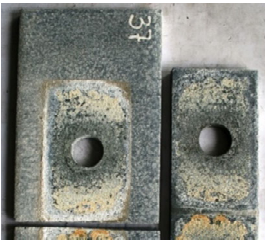
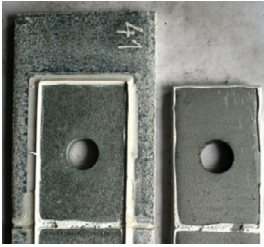
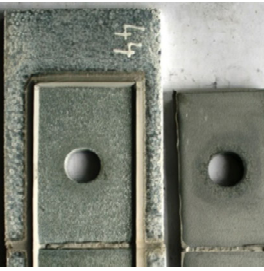
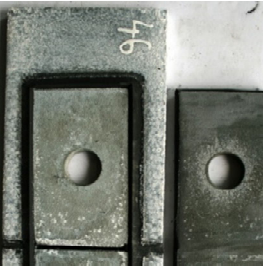
Die Probenauslagerung gefügter Probekörper erfolgte im Juli 2019 über die Belastungsdauer von einem Jahr. Aufgrund des Gewichtes der praxisrelevanten Probekörper erfolgte die natürliche und forcierte Freibewitterung auf umgebauten verstärkten Gestellen. Die Abbildung 21 zeigt die zu Belastungsbeginn auf einem dieser Gestelle ausgelagerten Probekörper.



**Abbildung 21:** Auslagerungsgestell in natürlicher Freibewitterung Dresden

Nach dem Belastungsende der einjährigen natürlichen und forcierten Freibewitterung erfolgte die visuelle Bewertung der Probekörper und Fügeelemente an den Außenflächen und nach deren Demontage im Fugenbereich. Ohne Dichtstoff Anwendung an der Fuge tritt Korrosion sowohl in natürlicher als auch in gemäß VDA 621 - 414 forcierter Freibewitterung in der Fuge auf. In Tabelle 11 sind ausgewählte demontierte Probekörper der Oberflächenkombination 1 (Zugstabplatte NT-verzinkt und Laschenplatte HT-verzinkt) nach forcierter Freibewitterung dargestellt.





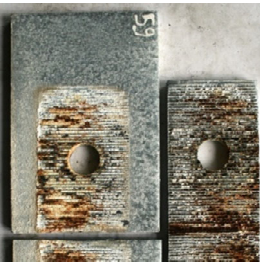
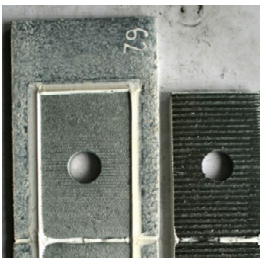
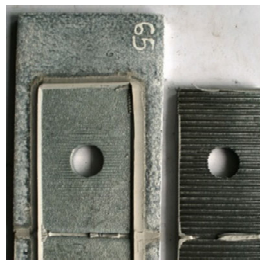
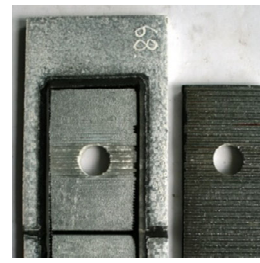
**Tabelle 11:** Gegenüberstellung der visuellen Korrosionsentwicklung der demontierten Fügeproben Oberflächenkombination 1 nach einem Jahr forcierte Freibewitterung gemäß VDA 621-414:02/1982

Probe 37 ohne DS Lasche HT verzinkt	Probe 41 MS-DS1 mit Lasche HT verzinkt	Probe 44 PUR-DS4 mit Lasche HT verzinkt	Probe 46 PUR-DS7 mit Lasche HT verzinkt
Außenansicht	Außenansicht	Außenansicht	Außenansicht
			
Innenansicht	Innenansicht	Innenansicht	Innenansicht
			

Auch an der Oberflächenkombination 2 (Zugstabplatte NT-verzinkt und Laschenplatte NT-verzinkt im Fugenbereich gefräst) erfolgte nach der einjährigen forcierten Freibewitterung gemäß VDA 621 – 414 die visuelle Bewertung der Außenseiten der Probekörper und nach deren Demontage im Fugenbereich und an den Fügeelementen. Exemplarisch sind die Ansichten der Probekörper in Tabelle 12 dargestellt



**Tabelle 12:** Gegenüberstellung der visuellen Korrosionsentwicklung der demontierten Fügeproben Oberflächenkombination 2 nach einem Jahr forcierte Freibewitterung gemäß VDA 621-414:02/1982

Probe 59 ohne DS Lasche NT verzinkt gefräst	Probe 62 MS-DS1 mit Lasche NT verzinkt gefräst	Probe 65 PUR-DS4 mit Lasche NT verzinkt gefräst	Probe 68 PUR-DS7 mit Lasche NT verzinkt gefräst
Außenansicht	Außenansicht	Außenansicht	Außenansicht
			
Innenansicht	Innenansicht	Innenansicht	Innenansicht
			

Die Fügeelemente weisen Rotrostkorrosionsstellen auf, die auf Beschädigung durch den Montagevorgang zurückgeführt werden. Die Fügeelemente lassen auch in der Freibewitterung den Zutritt des Elektrolyten in die Fuge der GV-Verbindung über die Gewindegänge zu. Die Fügeverbindungen der Oberflächenkombination 1 und 2, die mit dem Dichtstoff PUR-DS 7 an der Fuge abgedichtet wurden, zeigten Verfärbungen in der Fuge und fallen mit dunklerer Korrosion in der Fuge auf. Die Korrosionserscheinungen in der Fuge wurden im REM-EDX untersucht und sind Zinkoxide/-hydroxide. Des Weiteren wurde in der Fuge eine abnehmende Chlorid-Konzentration von salzhaltiger zu salzfreier Freibewitterung festgestellt.

An einer feuerverzinkten Stahl- und Verbundbrücke kann auf Basis der Ergebnisse die Korrosion in der Fuge einer GV-Verbindung der Oberflächenkombination 1 aus feuerverzinkten Trägern und HT-verzinkten Laschen bei natürlicher Freibewitterung ohne Salzeinwirkung durch Anwendung von Dichtstoff minimiert werden. Die Anwendung ist bei Bedarf mit MS-DS1 oder PUR-DS4 möglich. Um die Korrosion in der Fuge bei Verwendung der Oberflächenkombination 2 aus gefräster Lasche auf feuerverzinktem Träger zu vermeiden, ist in natürlicher Freibewitterung eine Dichtstoffanwendung unumgänglich. Dafür sind die Dichtstoffe MS-DS1 oder PUR-DS4 ebenfalls geeignet.

In Freibewitterung im Einflussbereich von Tausalzen ist an GV-Verbindungen der Oberflächenkombination 1 und der Oberflächenkombination 2 die Verwendung von Dichtstoff zur Verbesserung der Mediendichtheit und Korrosionsvermeidung in der Fuge an einer feuerverzinkten Stahl- und Verbundbrücke notwendig. Für die Bedingungen im Einflussbereich von Tausalzen ist der MS-DS1 oder PUR-DS4 geeignet.

Die Anwendung zur Abdichtung von Fugen am Übergang zwischen Feuerverzinkung und Beton ist bei Bedarf mit den Dichtstoffen PUR-DS4 oder PUR-DS7 möglich.

In der Freibewitterung wird die Schutzdauer der Dichtstoffe an der Fuge durch zwei Dinge bestimmt. Erstens die Alterung der Dichtstoffe durch die UV-Strahlung und zweitens durch die Bondline-Corrosion der Dichtstoffnaht am Zinküberzug. Der Einfluss auf diese beiden Eigenschaften wurde in einjähriger natürlicher und forcierter Freibewitterung auf dem Freibewitterungsstand in Dresden an gefügten Probekörpern untersucht.

Im Ergebnis ist die erfolgte Belastungsdauer in der natürlichen Freibewitterung nicht lang genug, um eine sichere Aussage zur Langzeitstabilität der Dichtstoffe unter natürlicher UV-Strahlung zu geben. Hier können die Ergebnisse der Farbmessung, Härtemessung und FT-IR Messung der Dichtstoffe unter UVA-Belastung gemäß DIN EN ISO 4892-3 Verfahren A mit einer Belastungsdauer von 2000h die Beständigkeit gegenüber UV - Strahlung bestätigen.

In der forcierten Freibewitterung kommt es im Bereich des Übergangs der Feuerverzinkung zur Dichtstoffraupe zu Bondline-Corrosion die unter dem Einfluss der Salzbelastung nach einem Jahr bereits etwa 100 µm beträgt. Nach einjähriger natürlicher Freibewitterung wurde im Lichtmikroskop am untersuchten Übergang der Feuerverzinkung zur Dichtstoffraupe keine Unterwanderung der Dichtstoffe durch Bondline-Corrosion festgestellt. Die Dichtstoffraupen waren auf den Feuerzinküberzügen an der im Querschliff in Richtung Fugenbereich untersuchten Kleblinie auch nach einem Jahr natürlicher und forcierter Freibewitterung noch intakt.

Mit den derzeitigen Dichtstoffen sind in Verbindung mit organischen Beschichtungssystemen Schutzdauern von 10 Jahren an den Fugen durchaus erreichbar. Diese können auch für die untersuchte Dichtverbindung verzinkter GV-Verbindungen angesetzt werden. Wie schnell die Korrosionserscheinung der Bondline-Corrosion durch Salzbelastung in der Praxis fortschreitet, ist von den Einsatzbedingungen vor Ort abhängig und kann mit den erarbeiteten Ergebnissen nicht beantwortet werden. Die Dichtfuge muss daher im praktischen Einsatz bei der regelmäßigen Brückenprüfung überwacht werden, um diese Fragestellung eindeutig zu beantworten.

## Bemessungskonzept

### Sicherstellung der Vorspannkkräfte

Die Ausführungsnorm DIN EN 1090-2 gibt für hochfest vorgespannte (HV) Schrauben das Kombinierte Verfahren vor, um die Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$  (volle Vorspannkraft) der Schrauben sicherzustellen. Da die Feuerverzinkungsschicht zu zusätzlichen Setzkraftverlusten führen kann, erreicht nur das Kombinierte Verfahren das notwendige Sicherheitsniveau.

Die folgenden Bauteilausführungen sind als Regelausführung für Sebesty- und Hochsilizium-Stahl anzuwenden. Ein Unterschreiten von  $F_{p,C}$  tritt nicht ein bei:

- Fügepartner / Brückenträger: NT-verzinkt, Zinküberzugdicke  $\leq 350\mu\text{m}$
- Lasche: gestrahlt und anschließend HT-verzinkt

Diese Verbindungen können in feuerverzinkter Variante ohne weiteren Montage- und Wartungsaufwand eingesetzt werden.

Anders ist dies bei Laschen mit Oberflächen nach DIN EN 1090-2, Tab. 17 mit höherer Zinküberzugdicke. Sie erreichen Vorspannkraftverluste in kritischer Höhe:

- NT-Verzinkung ( $250\mu\text{m}$ ), anschließend gesweept und optional ASI-beschichtet

Das Nachspannen der Verbindung bei diesen Oberflächenbearbeitungen ist zwingend erforderlich. Wenn auf das Nachspannen der Verbindung verzichtet werden soll, ist die Bemessung auf die Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}^* = 0,63 \cdot f_{ub} \cdot A_s$  zu beschränken.

Bei Sebestystahl sind deutlich erhöhte Zinküberzugdicken ( $> 350\mu\text{m}$ ) aufgrund erhöhter Kriecheffekte nicht zulässig. Bei Prüfungen mit feuerverzinkten Hochsilizium-Stählen treten diese Effekte nicht ein, hier sind auch höhere Zinküberzugdicken zulässig.

### Tragfähigkeit der Oberflächen

Die Feuerverzinkungsschichten wurden sowohl unter quasi-statischer Belastung als auch unter zyklischer Belastung geprüft. Es kann festgehalten werden, dass die charakteristischen Haftreibungszahlen auch unter zyklischer Last nutzbar sind. Auch hier gelten die Randbedingungen, wie Schichtdicke und Oberflächenbearbeitung. Die folgenden Bauteilausführungen, die Regelausführungen werden aufgrund der niedrigen Vorspannkraftverluste und dem geringen Bearbeitungsaufwand der Oberflächen für Sebesty- und Hochsilizium-Stahl empfohlen:

- Fügepartner / Brückenträger: NT-verzinkt ( $\leq 350\mu\text{m}$ )  
Lasche: gestrahlt und anschließend HT-verzinkt

→  $\mu = 0,25$

Bei Oberflächen nach DIN EN 1090-2, Tab. 17 wurden die in der Norm vorgegebenen Werte nicht erreicht. Die charakteristische Haftreibungszahl muss für folgende Verbindungen reduziert werden:

- Gleitklasse C: NT-Verzinkung ( $\leq 350\mu\text{m}$ ), gesweept  
→  $\mu = 0,25$  (statt  $\mu = 0,35$ )
- Gleitklasse B: NT-Verzinkung ( $\leq 350\mu\text{m}$ ), gesweept & ASI-beschichtet  
→  $\mu = 0,30$  (statt  $\mu = 0,40$ )



### Ermüdungsfestigkeit

Die Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Bauteile bei GV-Verbindungen gemäß DIN EN 1993-1-9 den Kerbfällen von unverzinkten Bauteilen zugeordnet. Für feuerverzinkte GV-Verbindungen unterschiedlicher Verfahren und Schichtdicken kann der Kerbfall 112 der unverzinkten Verbindung bestätigt werden. Auch für den dazugehörigen Kerbfall 90 des Bauteils mit Löchern ist dies der Fall.

## Ausführungskonzept

### Materialwahl

Sebisty-Stähle ( $0,14 \text{ M-\%} < \text{Si} < 0,25 \text{ M-\%}$ ) oder Hochsilizium-Stähle ( $\text{Si} > 0,28 \text{ M-\%}$ ) sind für die Feuerverzinkung aufgrund des begrenzten Schichtaufbaus und der Art der sich entwickelnden Schichten zu verwenden. Die oberflächigen Mischphasen der feuerverzinkten Hochsilizium-Stähle bieten aufgrund der höheren Härte eine höhere Tragfähigkeit und dadurch einen höheren Haftreibwert bei gleichzeitig geringerem Vorspannkraftverlust.

### Oberflächenvorbereitung

Die nach dem Stand der Technik verwendete Oberflächenbearbeitung der Stahlwerke zur Entfernung der Walzhaut/ Zunderschicht reicht aus, damit die erforderliche Rauheit zur Erreichung des Haftreibwertes nach der HT-Verzinkung ausreichend ist. Ist diese Rauheit nicht angegeben, so muss sie überprüft werden. Es muss sichergestellt werden, dass die Oberflächen vor der Feuerverzinkung eine

- mittlere Rautiefe  $R_z = 60 \mu\text{m} \pm 6$  haben.

Eine deutlich höhere Rauheit führt aufgrund der Schichtentwicklung zu geringeren Rauheiten der Feuerverzinkten Oberflächen, weshalb die Rauheit auch nach oben begrenzt ist.

### Feuerverzinkung

GV-Verbindungen benötigen für die volle Tragfähigkeit eine flächige Auflage der zu verbindenden Bleche. Daher ist bei der Feuerverzinkung der Bauteile auf folgende Punkte in der Durchführung zu achten:

- Keine Aufhängung durch die Schraubenlöcher
- Keine Zinknasen auf oder am Rand der Flächen
- Keine Fehlstellen im Zinküberzug an hochbeanspruchten Stellen (rund um die Schraubenlöcher)

Um den Zinküberzug im Zinkbad aufzubringen, werden gesonderte Punkte zur Aufhängung angebracht. Durch eine geeignete Wahl des Aufhängungspunktes wird gleichzeitig die Bildung von Fehlstellen an hochbeanspruchten Stellen und auch Zinknasen vermieden.

Eine Probeverzinkung mit ähnlichen Bauteilabmessungen wird empfohlen, um die Verzinkungsparameter festzulegen, durch die die gewünschte Schichtdicke zu erreichen ist.

- erforderliche Zinküberzugdicke nach Korrosionsschutzanforderung wählen:  
Sebisty-Stahl ( $0,14 \text{ M-\%} < \text{Si} < 0,25 \text{ M-\%}$ ) → Schichtdicke  $\leq 350 \mu\text{m}$   
Hochsilizium-Stahl ( $\text{Si} > 0,28 \text{ M-\%}$ ) → Schichtdicke unbegrenzt

### Montage

Die Feuerverzinkung der Bauteile sollte bis zur Montage vor unnötiger atmosphärischer Belastung bei Lagerung und Transport geschützt werden. Besonders im Bereich der Kontaktflächen der Verbindung sind Korrosionsprodukte zu vermeiden. Um dies zu erreichen, sollte ein möglichst zeitnahe Einbau der Bauteile nach der Feuerverzinkung empfohlen.

Das Aufbringen der Vorspannkraft in die Schrauben bei Montage erfolgt mittels des Kombinierten Verfahren nach DIN EN 1090-2.

Bei Oberflächen nach EN 1090-2, Tab. 17 mit erhöhter Zinküberzugsdicke

- NT-Verzinkung (250µm), gesweept
- NT-Verzinkung (250µm), gesweept & ASI-beschichtet

ist ein Nachspannen der Schrauben erforderlich:

1. Wartezeit  $\geq 24$  h
2. Weiterdrehwinkel von  $15^\circ$

Ein Nachspannen der Verbindung mittels Drehmomentenverfahren ist nicht zulässig. Wenn auf das Nachspannen der Verbindung verzichtet werden soll, ist die Bemessung auf die Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}^* = 0,63 \cdot f_{ub} \cdot A_s$  zu beschränken.

Abschließend müssen die Fugen und Spalte der Verbindung im Bereich von erwartetem Tausalzeinfluss gegen Eindringen von Feuchtigkeit geschützt werden. Als Korrosionsschutz werden Primer und Dichtstoffraupen nach den Vorgaben im Kapitel „Untersuchungen zur Abdichtung der Fuge und Spalte“ und den technischen Datenblättern der Hersteller appliziert. Die Umgebungsbedingungen müssen hierzu beim Vorbereiten der Oberflächen und Applizieren der Dichtstoffe beachtet werden.

Empfohlen werden bei der Anwendung auf feuerverzinkten Bauteilen:

- Dichtstoffe: Teroson MS 640, Otto Coll P83
- Primer: Teroson SB 450, Cleanprimer 1226 und Sika Haftreiniger 1/Primer-3 N

Die Applikation der Primer erfolgt mit einem fusselfreien Tuch.

Die im Projekt entwickelte anzuwendende Applikationstechnologie mit einem fusselfreien Tuch weicht bei Sika Primer-3 N von der Vorgabe des Datenblatts ab. Grund dafür ist, dass bei in die Fuge gelangendem Primer die Gefahr besteht, dass der nachfolgend applizierte Dichtstoff pastös bleibt und nicht aushärten kann. Daher ist es wichtig, dass die Primer sehr dünn mit einem fusselfreien Tuch aufgetragen werden, damit diese nicht in die Fuge gelangen können.

Auch im Einflussbereich einer natürlichen Belastung ohne Salzeinfluss kann eine Dichtstoffanwendung das Korrosionsverhalten in der Fuge verbessern, ist jedoch nicht zwingend erforderlich, solange beide Fügepartner der GV-Verbindung einen Zinküberzug in der Fuge aufweisen.

Bei der Abdichtung von Fugen am Übergang zwischen Feuerverzinkung und Beton ist bei Bedarf mit den Dichtstoffen Otto Coll P83 oder Sikaflex 11 FC möglich.

### Wartungskonzept

Die Wartung von feuerverzinkten Bauteilen, insbesondere auch Verbindungsstellen ist hinsichtlich der Überprüfung des Zinküberzugs und des aufgetragenen Dichtstoffs, aber auch hinsichtlich der Schraubenvorspannkraft von Bedeutung.

Die Überprüfung der Vorspannkraft der Schrauben ist für die meisten Fälle nicht erforderlich, wenn die Vorgaben des Bemessungs- und Ausführungskonzepts eingehalten werden. Für die Verbindungen mit Oberflächen nach DIN EN 1090-2, für die ein Nachspannen der Schrauben nach 24 h vorgeschrieben sind, ist ein Intervall von 3 Jahren für eine Überprüfung der Vorspannkraft zu empfehlen. Dazu eignet sich beispielsweise auch das Vorsehen von Ultraschall-Längenmessungen für Online Monitoring an Referenzschrauben je Stoß oder an allen Schrauben. Bei der Anwendung von Referenzschrauben empfiehlt es sich, den Prüfumfang der HV-Verbindungen im Unterschied zu den sonst geforderten 10 % auf 20 % der Schrauben eines Anschlusses zu erhöhen. Prüfverfahren, wie das Überprüfen des Drehmoments oder Klangprüfungen können die Höhe der Rest-Vorspannkraft nicht bewerten. Stark gerissene oder weitestgehend gelöste Schrauben werden hierbei jedoch erkannt.

Die Wartung des Zinküberzugs erfolgt durch Sichtprüfung, auch diese kann in die Brückenprüfungsintervalle aufgenommen werden. Insbesondere großvolumige Weißrostbildungen müssen überprüft und dokumentiert werden. Bei großvolumigen Weißrostbildungen handelt es sich um einen dicken weißen Belag, durch den die darunter liegende Feuerverzinkung nicht mehr erkennbar ist.

Die Wartung der Dichtstoffraupen erfolgt ebenfalls durch eine Sichtprüfung und kann in die Brückenprüfungsintervalle aufgenommen werden. Die Dichtstoffraupen werden auf Ablösungen, Rissbildungen und Poren untersucht. Weiterhin muss kritisch nach möglichen Unterrostungen durch Bondline-Corrosion der Dichtstoffraupen bei angrenzender Weißrostbildung geachtet werden. Bei starker Unterwanderung und Rissbildung der Dichtstoffraupen sind diese Korrosionsschutzgerecht zu erneuern.

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen der quasi-statischen Tragfähigkeit von feuerverzinkten GV-Verbindungen zeigten großes Potential für den Einsatz im Brückenbau. Vorteilhaft erweisen sich oberflächige Eisen-Zink-Legierungsphasen und Stähle mit einem hohen Siliziumgehalt. Geringere Tragfähigkeiten zeigten oberflächliche Reinzinkphasen. Aufgrund der aus dem Korrosionsschutz geforderten Werte für Zinkschichtdicken, treten diese weniger tragfähigen oberflächigen Reinzinkphasen häufiger auf. Eine Begrenzung der Zinküberzugsdicken ist erforderlich, um den Einfluss der oberflächlichen Reinzinkphasen auf die Tragfähigkeit zu begrenzen.

Auf Basis der Untersuchungen können drei Oberflächenkombinationen für feuerverzinkte GV-Verbindungen im Brückenbau empfohlen werden. Die beiden in DIN EN 1090-2, Tab 17 [7] enthaltenen feuerverzinkten Oberflächen können mit reduzierten Haftreibungszahlen und einer max. Zinküberzugsdicke von 250 µm eingesetzt werden. Die Schrauben dieser Verbindungen müssen nach dem ersten Setzen nachgespannt (Weiterdrehwinkel 15°) werden. Die dritte Oberflächenkombination wird mit unterschiedlichen Oberflächen auf Zugstab und Laschen ausgeführt (Fügepartner: NT-Verzinkt ≤ 350µm & Lasche: Oberfläche gestrahlt + HT-Verzinkt). Sie kann ohne weitere Vorgaben eingesetzt werden und ist daher die empfohlene Regelausführung.

Es wurden die für den Brückenbau geeigneten feuerverzinkten GV-Verbindungen in zyklischen Untersuchungen hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit des Zinküberzugs und des Materials überprüft. Die untersuchten Zinküberzüge zeigten kein negatives Verhalten unter zyklischen Lasten. Ausgewählte Proben zeigten sogar eine Erhöhung der quasi-statischen Tragfähigkeiten nach den zyklischen Belastungen. Damit ist keine Abminderung des Kerbfalls 112 für die feuerverzinkte GV-Verbindung notwendig.

Die Auswertung der Nutzwertanalyse für die Fugenabdichtung ergab drei gut geeignete Dichtstoffe Teroson MS 640, Otto Coll P83 und Sikaflex 11 FC (MS-DS1, PUR-DS4 und PUR-DS7) für die Anwendung an feuerverzinkten GV-Verbindungen. Als Primer sind Teroson SB 450, Cleanprimer 1226 und Haftreiniger 1/Primer 3N mit einer speziell entwickelten Applikationstechnologie mit einem fusselfreien Tuch anzuwenden. In Verbindung mit organischen Beschichtungssystemen sind mit den derzeitigen Dichtstoffen Schutzdauern von 10 Jahren an den Fugen durchaus erreichbar. Diese können auch für die untersuchte Dichtverbindung feuerverzinkter GV-Verbindungen angesetzt werden.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden in Form eines Bemessungskonzepts und Montagehinweisen für den Einsatz von feuerverzinkten GV-Verbindungen im Brückenbau aufbereitet.

## Literatur

- [1] *Ungermann, D.; Rademacher, D.; Oechsner, M. et al.*: FOSTA P835 - Feuerverzinken im Stahl und Verbundbrückenbau – IGF-Nr. 351 ZBG. FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf Ausgabe 2014.
- [2] *Bundesanstalt für Straßenwesen*: Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs- / Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken – RI-WI-BRÜ. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007.
- [3] *Bundesanstalt für Straßenwesen*: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 1-10 – ZTV-ING. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018.
- [4] 1076: DIN 1076 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung. DIN, Ausgabe November 1999.
- [5] *Kuhlmann, U.; Ummenhofer, T.; Zinke, T. et al.*: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken – Bericht zum Forschungsprojekt FE 089.0291/2013. Wirtschaftsverband N.W. Verlag für Neue Wissenschaft, Bremen.
- [6] *Lebelt, P.*: Herstellen von reparaturfähigen Feuerzinküberzügen. Projektträger für das BMWI: EuroNorm GmbH; Förderprogramm: INNO-KOM-Ost; Modul: Marktorientierte Forschung und Entwicklung; Projektnummer: MF130088 Ausgabe November 2017.
- [7] DIN EN 1090-2:2018:09 Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2018. DIN EN, Ausgabe September 2018.
- [8] *Ungermann, D.; Rademacher, D.; Pinger, T. et al.*: Entwurfshilfe zum Einsatz von feuerverzinkten Bauteilen im Stahl- und Verbundbrückenbau. *In*: bauforumstahl e.V (2016), B 505.
- [9] *Lebelt, P.; Gehrke, J.*: Korrosionsschutztechnologie für Montageschweißstöße einer feuerverzinkten Stahlbrücke. *In*: Stahlbau 86 (2017), Heft 2, S. 191-196. <https://doi.org/10.1002/stab.201720454>.
- [10] DIN EN 1993-2:2010-12 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken; Deutsche Fassung EN 1993-2:2006 + AC:2009. DIN EN, Ausgabe Dezember 2010.
- [11] 1994-2: DIN EN 1994-2:2010-12 Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 2: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für Brücken; Deutsche Fassung EN 1994-2:2005 + AC:2008. DIN EN, Ausgabe Dezember 2010.
- [12] DIN EN ISO 14713-1: Zinküberzüge - Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion - Teil 1: Allgemeine Konstruktionsgrundsätze und Korrosionsbeständigkeit. DIN EN ISO, Ausgabe August 2017.
- [13] *Schulz, W.-D.; Thiele, M.*: Feuerverzinken von Stückgut. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2012.
- [14] Korrosionsschutz durch Feuerverzinken. Institut Feuerverzinken.
- [15] *Peißker, P.; Huckshold, M.; Maaß, P. (Hrsg.)*: Handbuch Feuerverzinken. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2016.

- [16] 12944-3: DIN EN ISO 12944-3 Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 3: Grundregeln zur Gestaltung (ISO 12944-3:2017); Deutsche Fassung EN ISO 12944-3:2017. DIN EN ISO, Ausgabe April 2018.
- [17] *TAW-Verlag*: Korrosion und Korrosionsschutz von Werkstoffen – Teil II. Skript. TAW-Verlag, Vorlesung,, Wuppertal, 2007.
- [18] DIN EN 1993-1-9:2010-12 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009. DIN EN, Ausgabe Dezember 2010.
- [19] *Berto, F.; Razavi, S.; Ayatollahi, M.R. et al.*: Mechanical behaviour of hot dip galvanized steel connection under cyclic loading. *In*: Procedia Structural Integrity (2017), Heft 3, S. 77-84.
- [20] *Valtinat, G.; Huhn, H.*: Festigkeitssteigerung von Schraubenverbindungen bei ermüdungsbeanspruchten, feuerverzinkten Stahlkonstruktionen – Bericht Nr. 149 des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. *In*: Stahlbau (2003), Heft 10.
- [21] DIN 54457: Strukturklebstoffe - Prüfung von Klebverbindungen - Raupenschälprüfung. Ausgabe September 2014.
- [22] DIN EN ISO 4892-3: Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 3: UV-Leuchtstofflampen. Ausgabe Oktober 2016.
- [23] DIN EN ISO 6270-2: Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Beständigkeit gegen Feuchtigkeit - Teil 2: Kondensation (Beanspruchung in einer Klimakammer mit geheiztem Wasserbehälter). Ausgabe April 2018.
- [24] *Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.)*: VDA 233-102: Zyklische Korrosionssprüfung von Werkstoffen und Bauteilen im Automobilbau, 2013.
- [25] *Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.)*: VDA 621-415: Prüfung des Korrosionsschutzes von Kraftfahrzeuglackierungen bei zyklisch wechselnder Beanspruchung, 1982.
- [26] *Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.)*: VDA 621-414: Prüfung des Korrosionsschutzes von Kraftfahrzeuglackierungen durch Freibewitterung unter Verwendung von Salz, 1982.



## Anhang

## Zusammenfassung Bemessungskonzept

### Sicherstellung der Vorspannkkräfte

- Nur Kombiniertes Verfahren zum Aufbringen des erforderlichen Vorspannkraftniveaus  $F_{p,C}$  geeignet
- Regelausführung der Oberflächen für Sebistyl- oder Hochsilizium-Stahl (Kein Unterschreiten von  $F_{p,C}$  ohne Nachspannen):
  - Fügepartner / Brückenträger: NT-verzinkt, Zinküberzugdicke  $\leq 350\mu\text{m}$  (Hochsilizium-Stahl ohne Begrenzung)
  - Lasche: gestrahlt und anschließend HT-verzinkt
- Feuerverzinkte Oberflächen nach DIN EN 1090-2, Tab. 17 erreichen Vorspannkraftverluste in kritischer Höhe:
  - NT-Verzinkung ( $250\mu\text{m}$ ), anschließend gesweept und optional ASI-beschichtet
  - Nachspannen der Verbindung zwingend erforderlich oder Bemessung mit Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}^* = 0,63 \cdot f_{ub} \cdot A_s$
- Sebistylstahl: Deutlich erhöhte Zinküberzugdicken ( $> 350\mu\text{m}$ ) aufgrund erhöhter Krieeffekte nicht zulässig.  
Hochsilizium-Stahl: Keine Begrenzung der Zinküberzugsdicken

### Tragfähigkeit der Oberflächen

- Regelausführungen für Sebistyl- und Hochsilizium-Stahl:
  - Fügepartner / Brückenträger: NT-verzinkt ( $\leq 350\mu\text{m}$ )  
Lasche: gestrahlt und anschließend HT-verzinkt  

$\rightarrow \mu = 0,25$
- Reduzierung der Haftreibungszahlen für feuerverzinkte Oberflächen nach DIN EN 1090-2, Tab. 17 aufgrund erhöhter Krieeffekte der erhöhten Zinkschichtdicken:
  - Gleitklasse C: NT-Verzinkung ( $\leq 350\mu\text{m}$ ), gesweept  

$\rightarrow \mu = 0,25$  (statt  $\mu = 0,35$ )
  - Gleitklasse B: NT-Verzinkung ( $\leq 350\mu\text{m}$ ), gesweept & ASI-beschichtet  

$\rightarrow \mu = 0,30$  (statt  $\mu = 0,40$ )

### Ermüdungsfestigkeit

- Feuerverzinkte Bauteile von GV-Verbindungen können den Kerbfällen von unverzinkten Bauteilen nach DIN EN 1993-1-9 zugeordnet werden

## **Zusammenfassung Ausführungskonzept**

### **Materialwahl**

- Sebisty-Stähle ( $0,14 \text{ M-\%} < \text{Si} < 0,25 \text{ M-\%}$ ) oder Hochsilizium-Stähle ( $\text{Si} > 0,28 \text{ M-\%}$ ) sind zu verwenden.
- Wenn möglich Hochsilizium-Stähle bevorzugen (Aber: Geringe Verfügbarkeit am Markt)

### **Oberflächenvorbereitung**

- Rauheit nach Abstrahlen der Walzhaut/Zunderschicht erreicht erforderliche Rauheit zur Erreichung des Haftreibwertes nach HT-Verzinkung
  - mittlere Rautiefe  $R_z = 60 \mu\text{m} \pm 6$  haben.
  - Deutlich geringere oder höhere Rauheit sind zu vermeiden

### **Feuerverzinkung**

- Zu beachten für volle Tragfähigkeit der GV-Verbindungen:
  - Keine Aufhängung durch die Schraubenlöcher
  - Keine Zinknasen auf oder am Rand der Flächen
  - Keine Fehlstellen im Zinküberzug an hochbeanspruchten Stellen (rund um die Schraubenlöcher)
- Gesonderte Punkte zur Aufhängung vorsehen
- Probeverzinkung mit ähnlichen Bauteilabmessungen wird empfohlen
- Erforderliche Zinküberzugdicke nach Korrosionsschutzanforderung wählen:  
Sebisty-Stahl ( $0,14 \text{ M-\%} < \text{Si} < 0,25 \text{ M-\%}$ ) → Schichtdicke  $\leq 350 \mu\text{m}$   
Hochsilizium-Stahl ( $\text{Si} > 0,28 \text{ M-\%}$ ) → Schichtdicke unbegrenzt

### **Montage**

- Bereich der Kontaktflächen der GV-Verbindungen bei Lagerung und Transport schützen
- Möglichst zeitnaher Einbau der Bauteile nach der Feuerverzinkung empfohlen
- Aufbringen der Vorspannkraft mittels Kombinierten Verfahren
- Bei Oberflächen nach EN 1090-2, Tab. 17 mit erhöhter Zinküberzugsdicke
  - NT-Verzinkung ( $250\mu\text{m}$ ), gesweept
  - NT-Verzinkung ( $250\mu\text{m}$ ), gesweept & ASI-beschichtet

ist ein Nachspannen der Schrauben erforderlich:

3. Wartezeit  $\geq 24 \text{ h}$
4. Weiterdrehwinkel von  $15^\circ$

Nachspannen mittels Drehmomentenverfahren nicht zulässig

- Fugen und Spalte im Bereich von erwartetem Tausalzeinfluss abdichten
- Primer und Dichtstoffraupen applizieren (Umgebungsbedingungen beachten)
- Empfohlen werden bei der Anwendung auf feuerverzinkten Bauteilen:
  - Dichtstoffe: Teroson MS 640, Otto Coll P83

- Primer: Teroson SB 450, Cleanprimer 1226 und Sika Haftreiniger 1/Primer-3 N (Applikation mit fusselfreiem Tuch)
- Dichtstoffanwendung kann Korrosionsverhalten ohne Salzeinfluss in Fuge verbessern
- Abdichtung von Fugen Übergang Feuerverzinkung und Beton (Bei Bedarf): Dichtstoffe Otto Coll P83 oder Sikaflex 11 FC

### Zusammenfassung Wartungskonzept

- Überprüfung Vorspannkraft Schrauben bei Regelausführung nicht erforderlich
- Überprüfung Vorspannkraft bei nachgespannten Schrauben bei Brückenprüfung
  - Empfohlener Prüfumfang: 10 % bis 20 % der Schrauben
  - Prüfung mittels Ultraschall-Längenmessungen mit Referenzschrauben
  - Überprüfen des Drehmoments oder Klangprüfungen nicht empfohlen
- Wartung des Zinküberzugs durch Sichtprüfung bei Brückenprüfung
  - Untersuchung auf großvolumige Weißrostbildung
- Wartung der Dichtstoffraupen durch Sichtprüfung bei Brückenprüfung
  - Untersuchung auf Ablösungen, Rissbildungen und Poren
  - Untersuchung auf Unterrostungen bei angrenzender Weißrostbildung
  - Erneuerung bei starker Unterwanderung und Rissbildung der Dichtstoffraupen