

# Feuerverzinken im Brückenbau - Neue Entwicklungen



BASt Fachgespräch Stahlbrückenbau - 28. März 2023



Technische Universität Dortmund  
Lehrstuhl Stahlbau

**Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann**

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Bettina Brune

Peter Hatke, M.Sc.

Johannes Grote, M.Sc.

Michael Diener, B.Sc.



Technische Universität Darmstadt  
MPA / IfW Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Dr.-Ing. Marcus Klein

Dipl.-Ing. Anna-Katharina Kraemer



Institut für Korrosionsschutz  
Dresden GmbH

Dr.-Ing. Susanne Friedrich

Dipl.-Ing. (FH) Peter Lebelt

## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- **Motivation und Forschungsanlass**
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
- Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
- Ausführung von Montagestößen
- Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
- Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
- Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken
- Ausblick auf kommende Forschungsthemen

## Motivation & Anlass / Stand der Technik vor Start der Untersuchungen

- Zahlreiche feuerverzinkte Brücken insbesondere in Nordamerika und Japan belegen den nachhaltigen und dauerhaften Schutz durch die Feuerverzinkung
- Feuerverzinkte Brücken wurden in Deutschland bisher nicht gebaut

In der Vergangenheit gebaute feuerverzinkte Brücken:

Ehzer-Brücke, 1945, Niederlande



Quelle: Jan Draijer

Stainsby-Hall, 1974, Großbritannien



Quelle: Industrieverband Feuerverzinken e.V.

## Motivation & Anlass / Stand der Technik vor Start der Untersuchungen

### Gründe für bisher fehlende Anwendung:

- Fehlende Beurteilung des Korrosionsschutzverhalten der Feuerverzinkung unter den spezifischen Bedingungen des Brückenbaus
- Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit unklar, wissenschaftliche Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten fehlten

### Ziel der Untersuchungen:

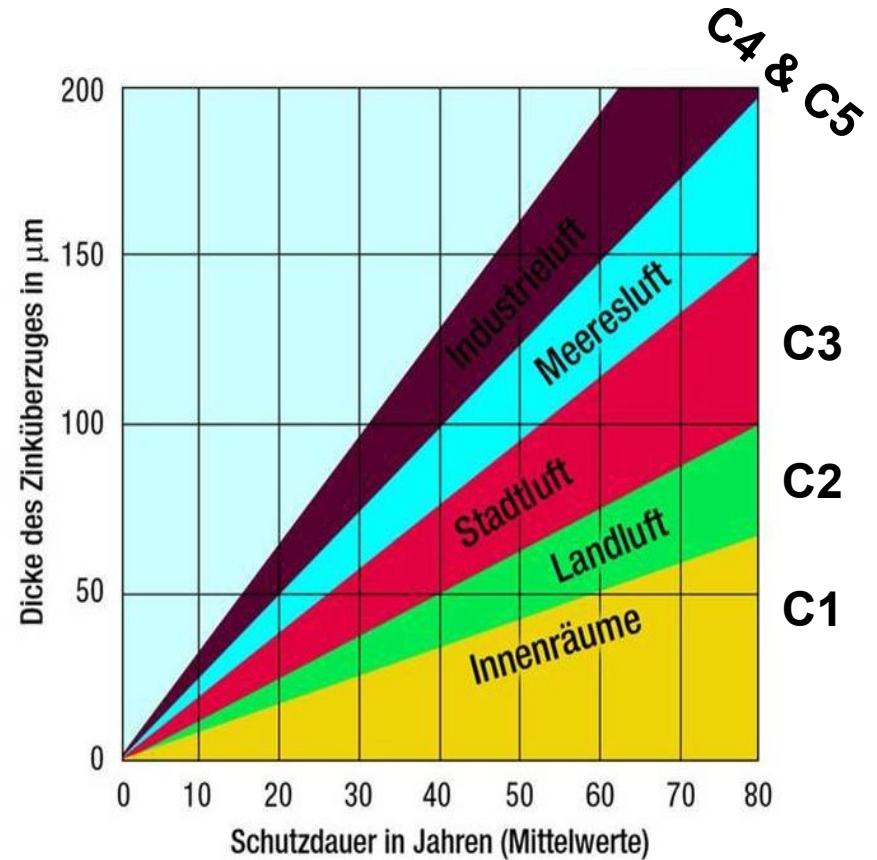
- Ist ein lebenslanger Korrosionsschutz durch Feuerverzinken möglich?
- Ist die Ermüdungsfestigkeit durch die Feuerverzinkung beeinflusst?

## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- Motivation und Forschungsanlass
- **Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau**
- Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
- Ausführung von Montagestößen
- Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
- Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
- Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken
- Ausblick auf kommende Forschungsthemen

## Schutzdauer einer Feuerverzinkung

- Schutzdauer einer Feuerverzinkung ist abhängig von den Umgebungsbedingungen (Korrosivitätsklassen)
- Die Korrosionsschutzdauer einer Feuerverzinkung mit üblicher Schichtdicke ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ) und Umgebung C1/C2 beträgt bis zu ca. 80 Jahren
- Ständige Luftverbesserungen in den letzten Jahren führen zu einer Verlängerung der Schutzdauer
- **Brücken unterliegen einer erhöhten Korrosionsbeanspruchung**  
→ vgl. C3 bis C5



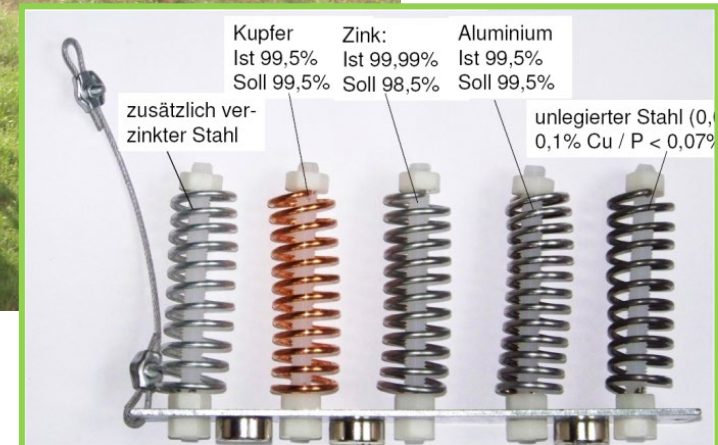
Schutzdauer von Zinküberzügen  
Quelle: Handbuch Feuerverzinken

## Schutzdauer einer Feuerverzinkung im Brückenbau (C3 – C5) GAV-Studie zu aktuellen Korrosivitäten in Deutschland



**Beispiel:**  
Brücke  
über A4 in  
Thüringen

- Auslagerung an 6 Brückenstandorten mit unterschiedlichen Umweltbedingungen
- Beginn 2011 – Auswertung in 2012, 2013 und 2016



**Ausgelagerte Probekörper für Korrosionsmessung**  
(Auslagerung ab 2011 / Ab 2012 normativ geänderte Geometrie der Proben)

## Ergebnisse der Korrosionsmessungen

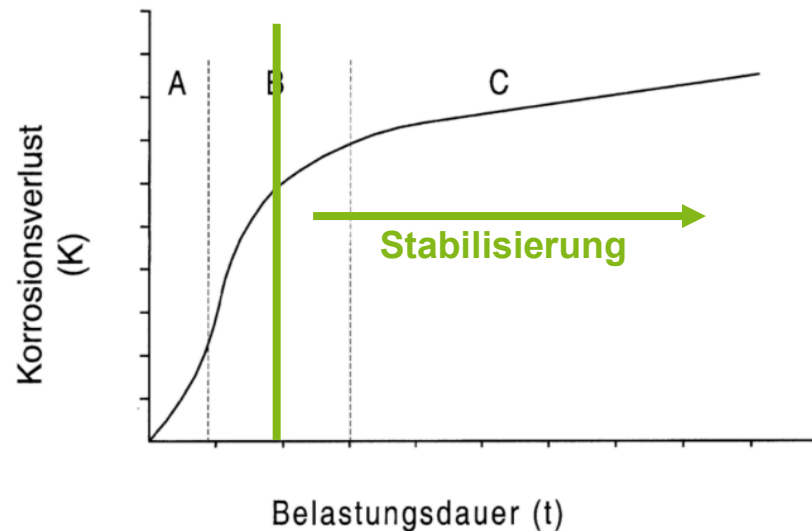
Der höchste Zinkabtrag wurde nach einem Jahr an einer Brücke über die A4 in Thüringen gemessen:

- $r_{corr/zink} = 2.65 - 4.11 \mu m$   
(gemessener Zinkabtrag im ersten Jahr)
- Entspricht Korrosivitätskategorie C4

Abschätzung der Schutzdauer gemäß EN ISO 9224:

- $D_{zinc} = r_{corr/zinc} \cdot t^b$
- Nutzungsdauer  $t = 100$  Jahre & Zeitexponent  $b = 0,873$  (abhängig von Material und Umgebung)

Schematische Darstellung des Zinkabtrags über die Zeit

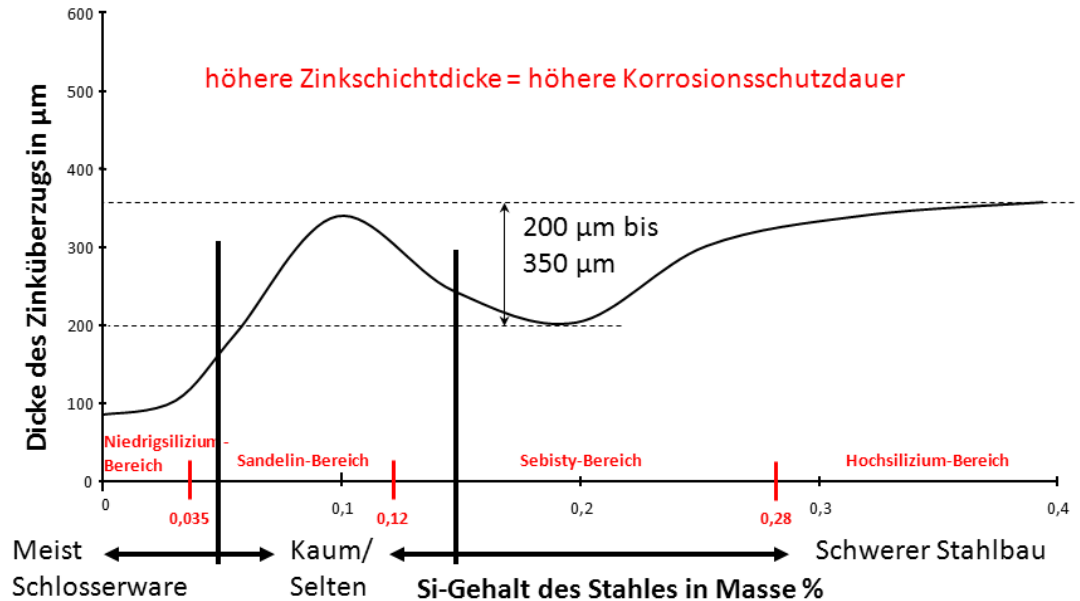


→ **Entscheidender Einflussfaktor für den tatsächlichen Zinkabtrag: Mikroklima, bspw. im Bereich von Tausalzsprühnebel**



## Zusammenfassung zum Korrosionsschutz durch Feuerverzinken

- Eine **100-jährige Schutzdauer** erfordert eine Schichtdicke von **147 – 252  $\mu\text{m}$**  (Korr.-Kat. C4)
- **Schichtdicken > 200  $\mu\text{m}$**  sind mit den üblichen Baustählen (Sebistybereich) **problemlos erreichbar**

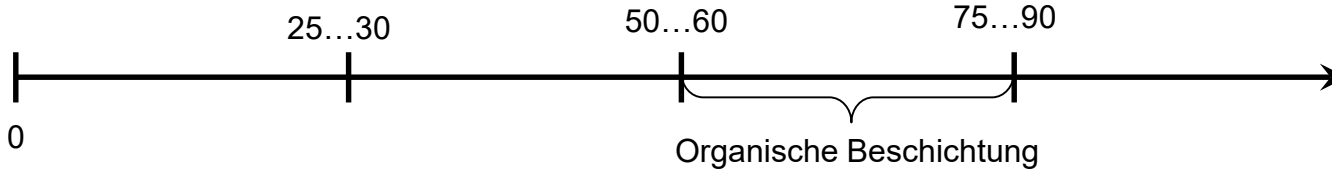


Dicke von Zinküberzügen abhängig vom Siliziumgehalt  
Quelle: Thiele, M. et al. GAV Bericht 158

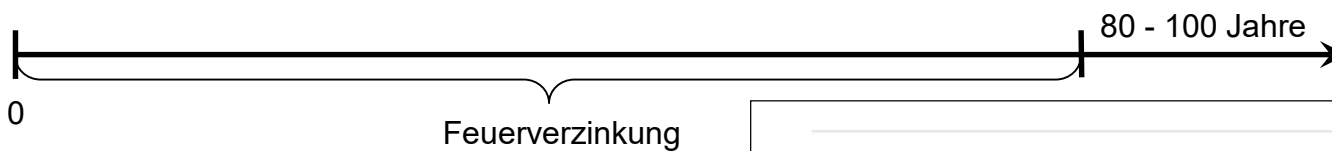
- **Untersuchungen und Berechnungen belegen, dass die Feuerverzinkung unter den gefundenen atmosphärischen Belastungsbedingungen einen lebenslangen Korrosionsschutz gewährleisten kann.**

## Vergleich Schutzdauer & Kosten: Organ. Beschichtung - Feuerverzinkung

### Theoretische Schutzdauer organische Beschichtung

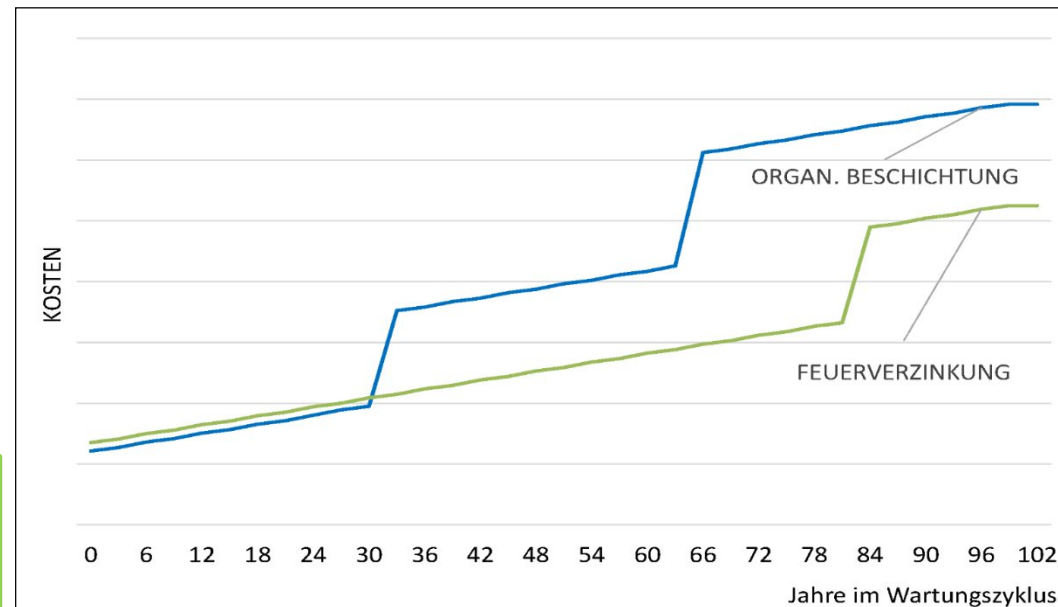


### Theoretische Schutzdauer Feuerverzinkung



- Zweimalige Ausbesserung und Erneuerung der organischen Beschichtung erforderlich (Intervall ca. 33 Jahre)
- Einbezug einer eventuellen Ausbesserung der Feuerverzinkung nach ca. 80 Jahren

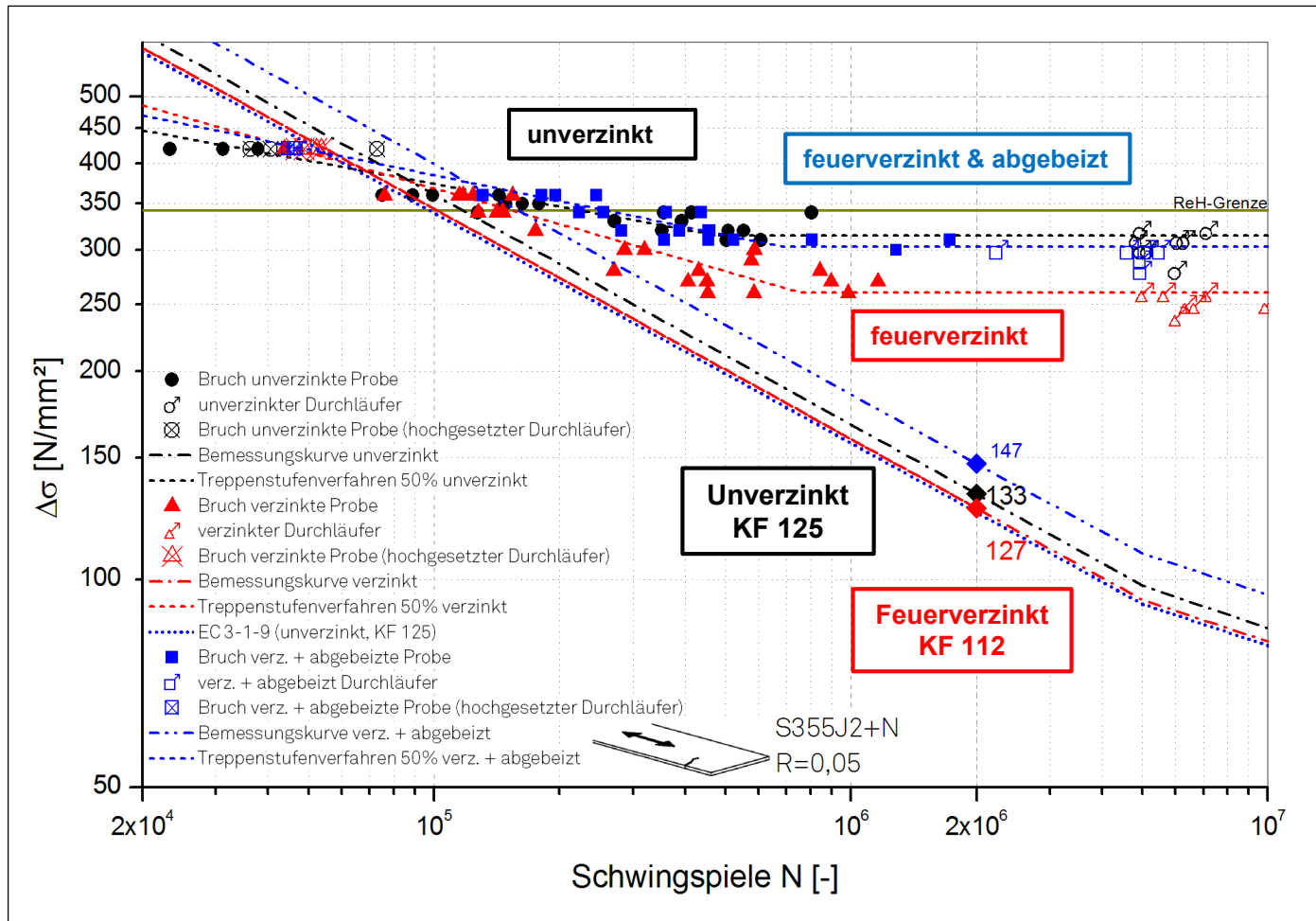
→ **Feuerverzinkung bietet über die Lebensdauer wirtschaftliche Vorteile!**



## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- Motivation und Forschungsanlass
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
- **Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details**
- Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
- Ausführung von Montagestößen
- Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
- Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
- Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken
- Ausblick auf kommende Forschungsthemen

## Versuche an Kleinteilproben mit unterschiedlichen Oberflächen

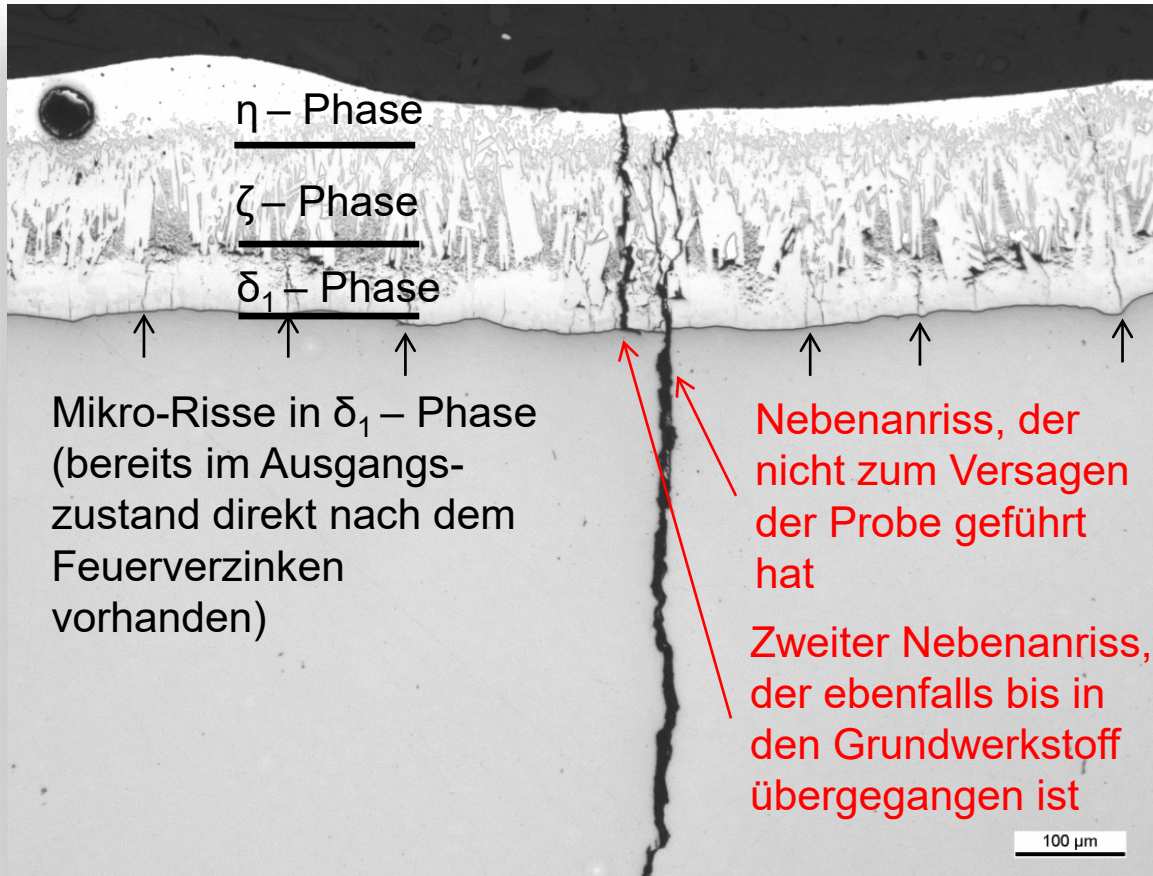


Zyklische Beanspruchung



Zyklische Beanspruchung

## Analyse von feuerverzinkten Kleinteilproben nach Ermüdungsversagen



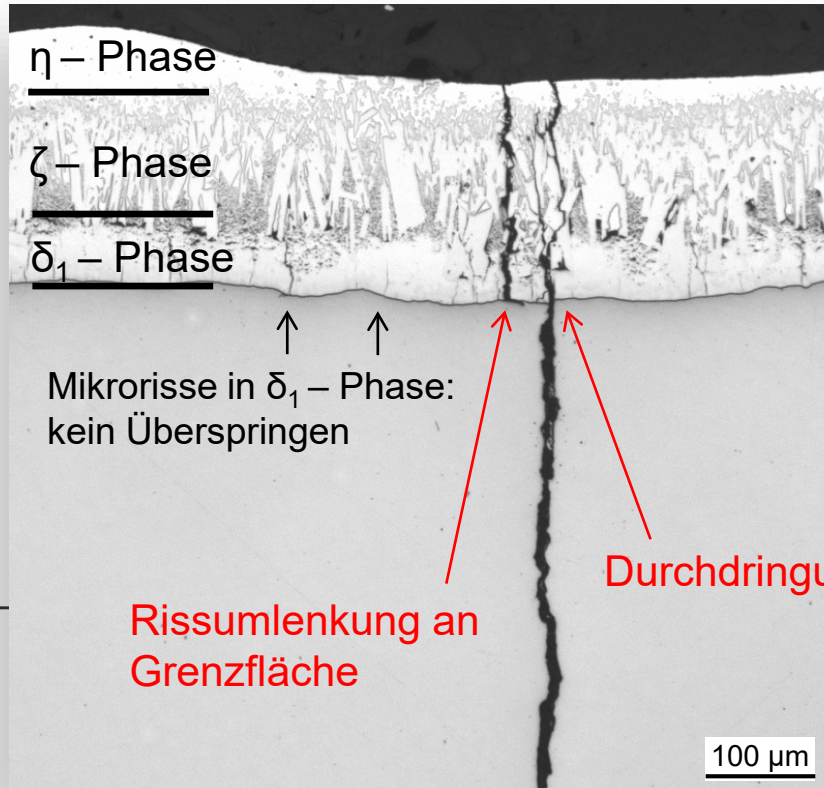
Quelle: MPA Darmstadt

### Erkenntnisse:

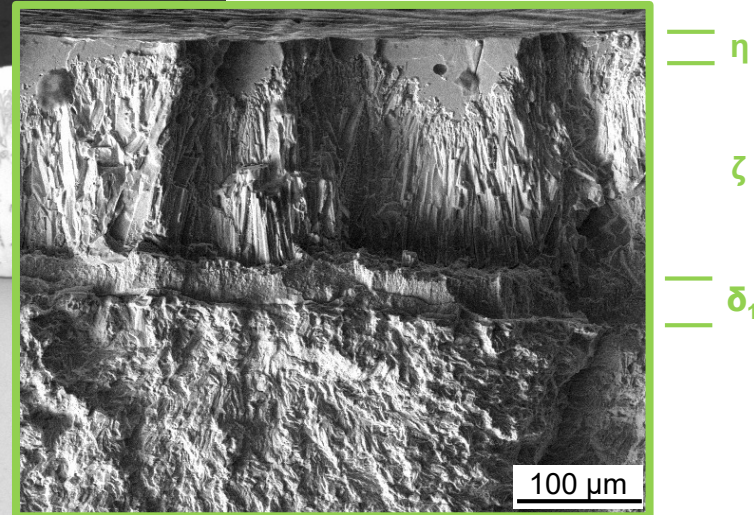
- Reduktion der Ermüdungsfestigkeit bei feuerverzinkten Kleinteilproben
  - Feuerverzinkte und danach abgebeizte Proben erreichen gleiche Ermüdungsfestigkeit wie unverzinkte Proben
- Ursache der Reduktion muss in der Fvz.-Schicht liegen

- **Ursache:** Im Feuerverzinkungs-Prozess entstehen Mikrorisse im Überzug, die in das Grundmaterial wachsen

## Analyse von feuerverzinkten Kleinteilproben nach Ermüdungsversagen



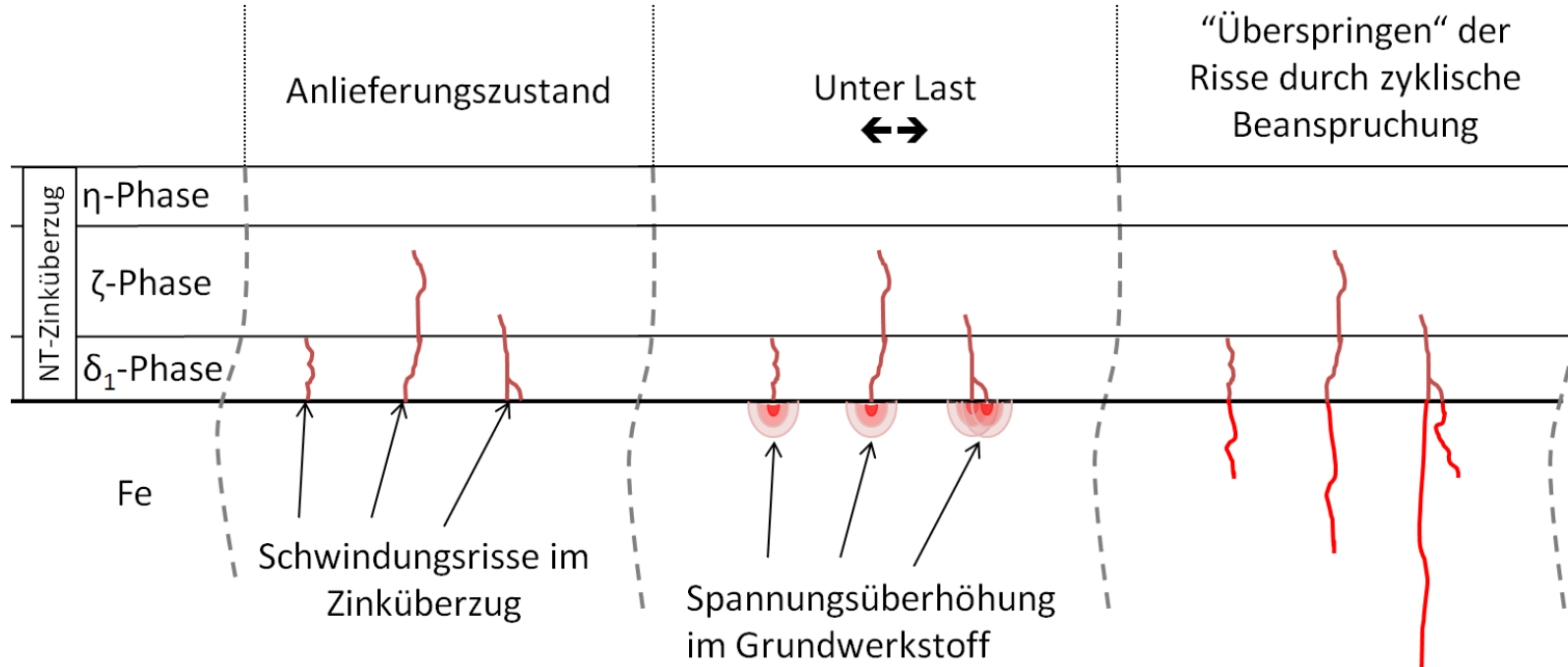
### Untersuchte Bruchfläche



**ζ – Phase:** monokliner Aufbau, niedriger E-Modul  
Rissinitiierung!!

Quelle: MPA Darmstadt – Anna-K. Kraemer

## Hypothese zur Rissinitiierung

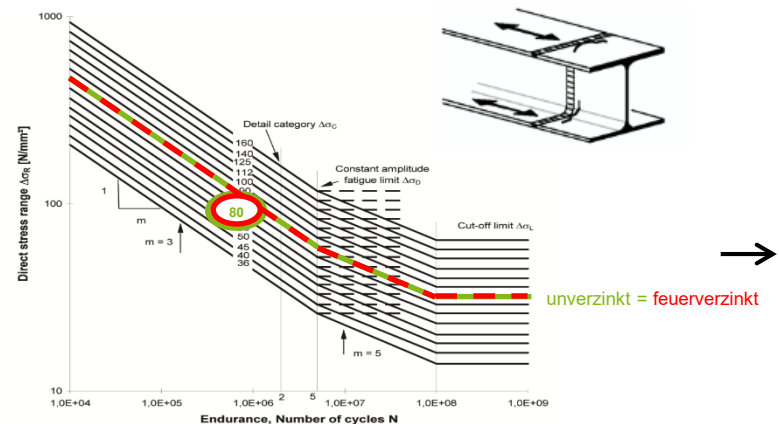
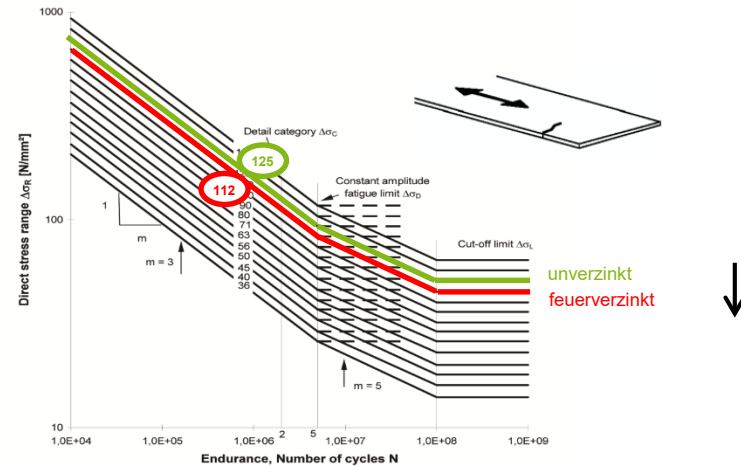


**Hypothesen:** Die Risse in der  $\delta_1$ -Phase rufen eine Spannungsüberhöhung (Kerbwirkung) im Grundwerkstoff hervor, die das Wachsen des Risses in den Grundwerkstoff zur Folge haben kann

Spannungsüberhöhung steigt mit Zinkschichtdicke → Ermüdungsfestigkeit abhängig von Zinküberzugsdicke

## Fazit der Untersuchungen der Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Bauteile

- Alle notwendigen Kerbfälle für die Anwendung bei Brücken im mittleren Spannweitenbereich wurden untersucht
- Hoher Kerbfall (ungeschweißtes Blech) ist bei Anwendung der Feuerverzinkung abzumindern
- Für untersuchte niedrige Kerbfälle (bspw. 80) keine Abminderung erforderlich
  - Hier dominiert der Einfluss der Geometrie & Metallurgie infolge Schweißen, da Einfluss des Zinküberzugs vernachlässigbar
- Einfluss der Feuerverzinkung auf Ermüdungsfestigkeit niedrigerer Kerbfälle ist aktueller Gegenstand weiterer Untersuchungen





## Integration feuerverzinkter Kerbfälle in die prEN 1993-1-9

- In DIN EN 1993-1-9:2010 sind keine Regelungen für feuerverzinkte Konstruktionen enthalten
- Entwurf zur Überarbeitung beinhaltet Regelungen für feuerverzinkte Kerbdetails
- Zahlreiche europäische Forschungsergebnisse der letzten Jahre sind in die Überarbeitung eingeflossen
- Individuelle Festlegung je nach Kerbdetail:
  - **Einzelne Details mit höherer Ermüdungsfestigkeit werden abgemindert** (Bspw. Bleche und Flachstähle, geschraubte und geschweißte Verbindungen)

DEUTSCHE NORM		Dezember 2010
	DIN EN 1993-1-9	<b>DIN</b>
ICS 91.010.30; 91.080.10	Ersatzvermerk siehe unten	
<p><b>Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009</b></p> <p>Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue; German version EN 1993-1-9:2005 + AC:2009</p> <p>Eurocode 3: Calcul des structures en acier – Partie 1-9: Fatigue; Version allemande EN 1993-1-9:2005 + AC:2009</p>		
<p><b>Ersatzvermerk</b></p> <p>Ersatz für DIN EN 1993-1-9:2005-07; mit DIN EN 1993-1-1:2010-12, DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-3:2010-12, DIN EN 1993-1-3/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-5:2010-12, DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-8:2010-12, DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-9/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-10:2010-12, DIN EN 1993-1-10/NA:2010-12, DIN EN 1993-1-11:2010-12 und DIN EN 1993-1-11/NA:2010-12 Ersatz für DIN 18800-1:2008-11; Ersatz für DIN EN 1993-1-9 Berichtigung 1:2009-12</p>		
Gesamtumfang 43 Seiten		
Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN		
<p><small>© DIN Deutsches Institut für Normung e. V. - Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet. Alternativtext der Normen durch Beuth Verlag GmbH, 10775 Berlin</small></p> <p><small>Preisgruppe 17 www.din.de www.beuth.de</small></p> <p><small>172266</small></p>		


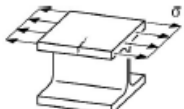
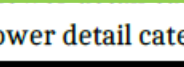



Bemessungsnorm DIN EN 1993-1-9:2010

Quelle: Beuth-Verlag

## Integration feuerverzinkter Kerbfälle in die prEN 1993-1-9

### Beispiel für die Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details Hier: Ungeschweißte Bauteile

Table 10.1: Plain members

Detail category	Constructional detail	Description	Supplementary Requirements	
180 $m_1 = 5$	① 	Rolled or extruded products subject to normal stress: ① plates and flats with as rolled edges; ② rolled sections with as rolled edges; ③ seamless hollow sections, either rectangular or circular	ⓐ, ⓑ, ⓒ: Defects, sharp edges and rolling flaws should be removed by grinding until a smooth transition is achieved with mean surface roughness depth in the order of mill scale ( $R_z \leq 200 \mu\text{m}$ ). Repair by welding not allowed, requiring following technical delivery conditions: ⓐ: Class A3 acc. to EN 10163-2. ⓒ: Option 1.5 acc. to EN 10210	
	② 			
160	③ 		ⓐ, ⓑ, ⓒ: Defects, sharp edges and rolling flaws should be removed by grinding until a smooth transition is achieved. Repair by welding not allowed, requiring following technical delivery conditions:	
125 $m_1 = 5$	④ 	Sheared or thermally cut material subject to normal stress: ⓐ with subsequent grinding; ⓒ with subsequent deburring	ⓐ, ⓑ, ⓒ: Defects, sharp edges and rolling flaws should be removed by grinding until a smooth transition is achieved. Repair by welding should be followed by grinding until a smooth transition is achieved.	
160 $m_1 = 5$	⑤ 		Stress concentrations due to macro-geometric effects should be accounted for. $\Delta\sigma$ should be calculated using net section including appropriate stress concentration factors.	ⓐ Mean surface roughness depth after grinding in the order of mill scale ( $R_z \leq 200 \mu\text{m}$ ). Repair by welding not allowed.
125 $m_1 = 5$	⑥ 		ⓐ Thermal cut quality acc. to EN 9013 with mean surface profile range 2. Repair by welding followed by grinding until a smooth transition is achieved.	
For ⓐ to ⓒ made of weathering steel the next lower detail category of Figure 8.1 should be used, but not higher than Detail Category 140. For ⓐ to ⓒ with hot dip galvanizing the next lower detail category of Figure 8.1 should be used, but not higher than Detail Category 140.				

For ① to ⑥ with hot dip galvanizing the next lower detail category of Figure 8.1 should be used, but not higher than Detail Category 140.

Auszug aus prEN 1993-1-9

## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- Motivation und Forschungsanlass
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
- Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- **Verbunddübelleisten zur Schubübertragung**
- Ausführung von Montagestößen
- Feuerverzinken bei Brücken mit kleinen Hohlkästen
- Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
- Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken
- Ausblick auf kommende Forschungsthemen

## Verbunddübelleiste als wirtschaftlicher Ersatz für Kopfbolzendübel

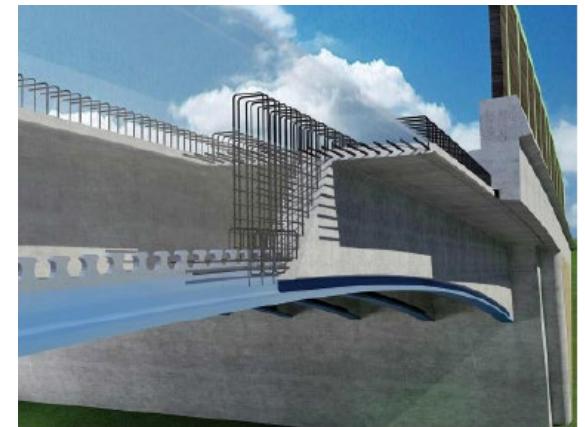
- Verbunddübelleiste (VDL) als innovatives und wirtschaftliches Verbundmittel
- Verbunddübelleiste über **allgemeine Bauartgenehmigung** zugelassen (Z-26.4-56, gültig bis 2023)
- Feuerverzinkte Ausführung der VDL bisher nicht enthalten
- Bisher: **Zustimmung im Einzelfall (ZiE)** erforderlich

### Offene Fragestellungen:

- Ermüdungsfestigkeit von Verbunddübelleisten (VDL) abhängig von Herstellung, Nachbearbeitung und Feuerverzinkung
- ➔ FOSTA Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit RWTH Aachen – Institut für Stahlbau und Leichtmetallbau, Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann



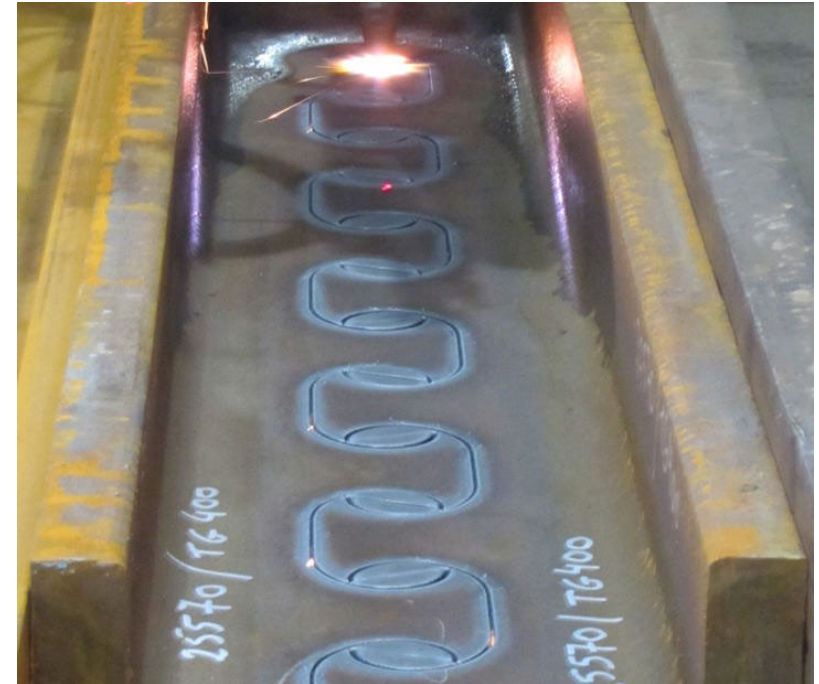
Feuerverzinkte Verbunddübelleiste



Visualisierung der PreCoBeam-Bauweise  
Quelle: Elsterbrücke Osendorf, Ernst & Sohn

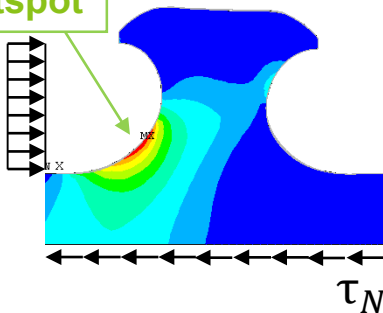
## Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Verbunddübelleisten

- Herstellung meist mittels thermischer Trennung
- Ggf. nachträgliches Beschleifen der Schnittkante zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit
  - Kerbfall 125 ohne Bearbeitung
  - Kerbfall 140 mit Bearbeitung
- Ermüdungsfestigkeit von VDL von lokalen und globalen Spannungsspitzen bestimmt

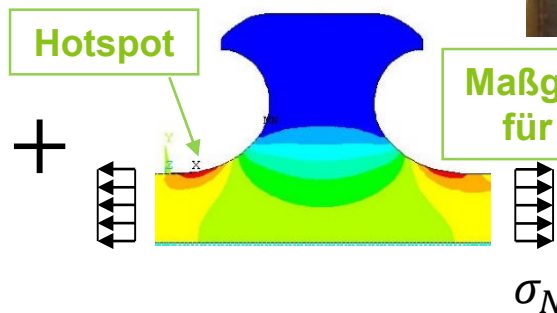


Herstellung von Verbunddübelleisten  
Quelle: ArcelorMittal Europe

Hotspot



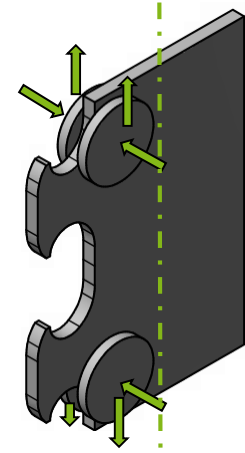
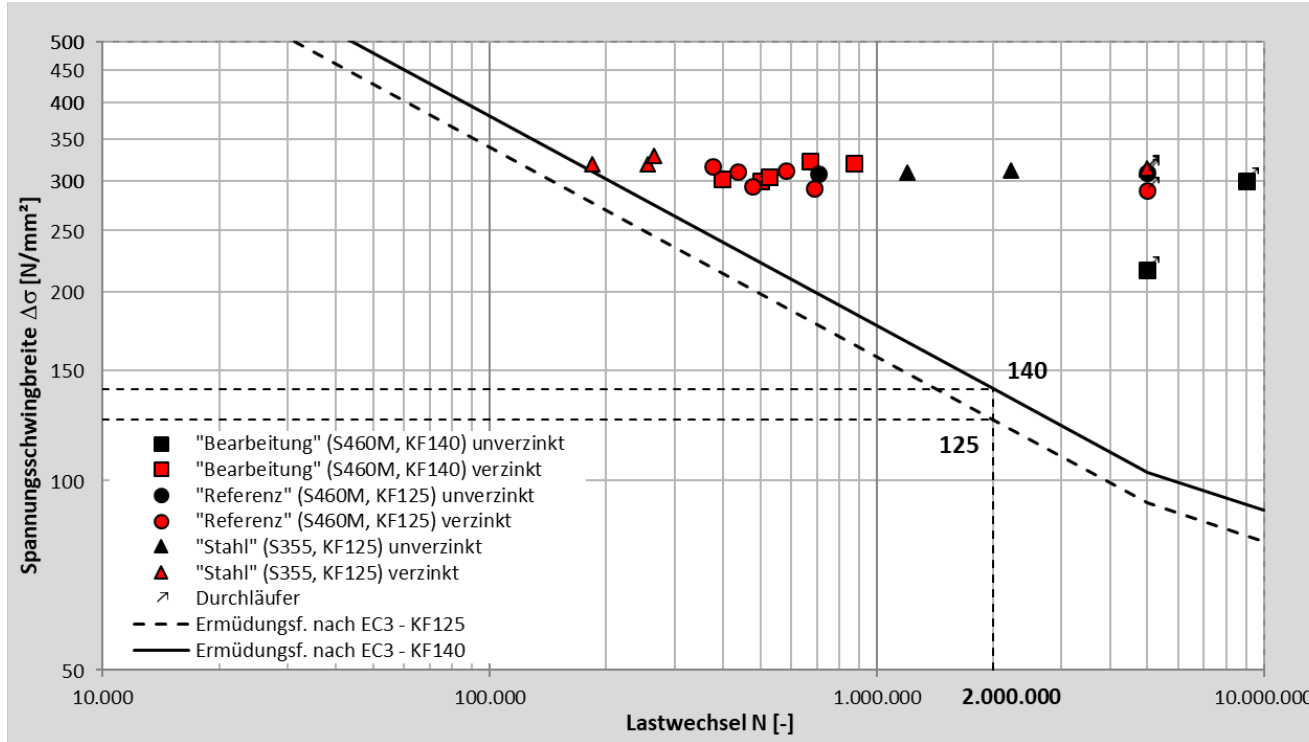
Lokale Spannungsspitze



globale Spannungsspitze

Maßgeb. Hotspots für Ermüdung

## Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Verbunddübelleisten



### Ergebnis der Untersuchungen:

- Brennschnitt beeinflusst oberflächlichen Si-Gehalt → dünner Zinküberzug
- Nachträgliches Schleifen entfernt die Einflusszone des Brennschnitts → dickerer Zinküberzug

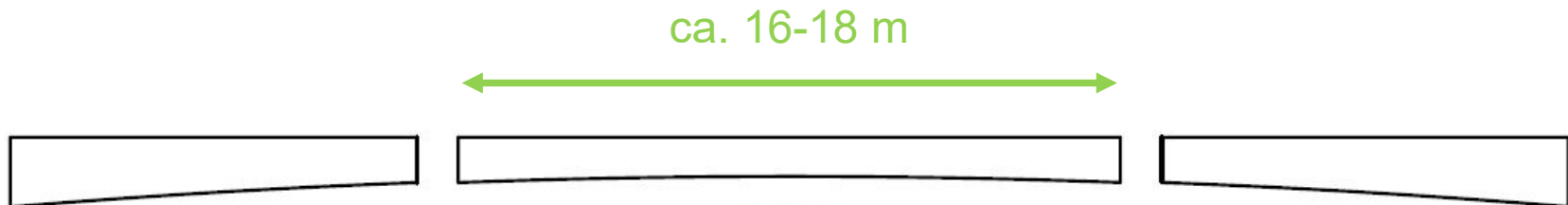
→ **Einflüsse auf Ermüdungsfestigkeit aus Brennschnitt und dickerer Zinkschicht heben sich gegenseitig auf → Kerbfall 125 (mit und ohne Beschleifen und verzinkt)**

## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- Motivation und Forschungsanlass
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
- Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
- **Ausführung von Montagestößen**
- Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
- Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
- Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken
- Ausblick auf kommende Forschungsthemen

## Ausführung von Montagestößen

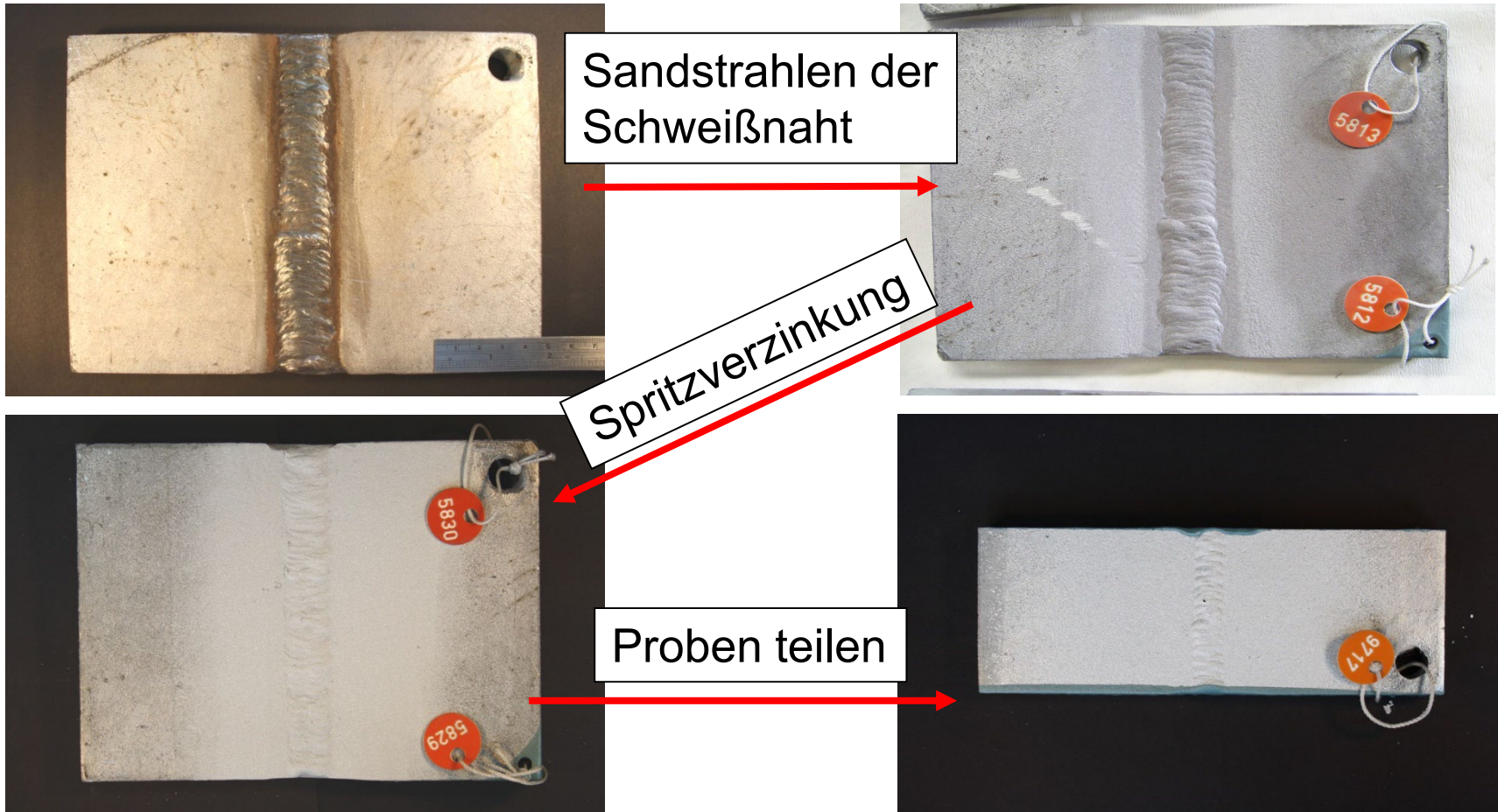
- Begrenzte Abmessungen der Verzinkungsbecken (Länge ca. 16-19 m, Breite und Tiefe ca. 2,0 -3,0m) führt zwangsläufig zu Fügestellen der Brückenteile



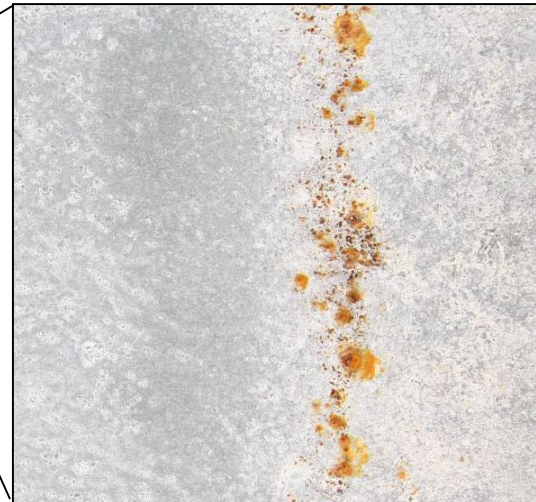
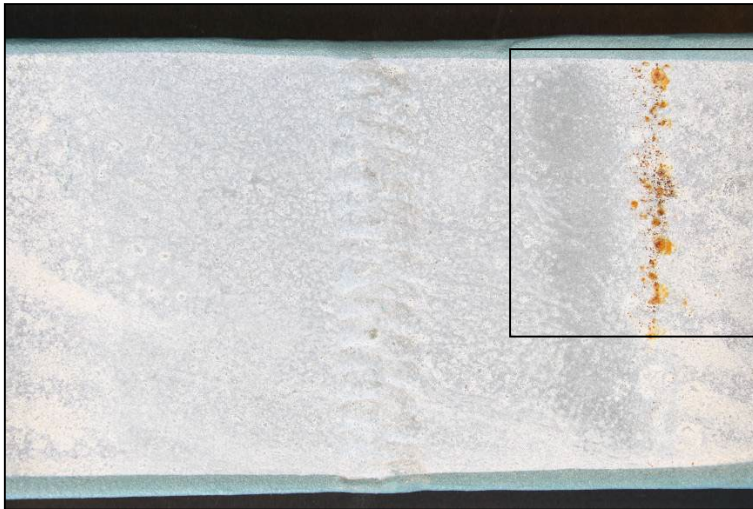
- In Deutschland werden derzeit fast ausschließlich Schweißverbindungen für Montagestöße verwendet.
- **Problem: Korrosionsschutz** Feuerverzinkung wird örtlich im Stoßbereich **zerstört**
- **Lösungen:**
  - Herstellung eines geschweißten Baustellenstoßes mit **nachträglicher Spritzmetallisierung** (DIN EN ISO 2063-1 & -2)
  - Herstellung eines geschraubten Baustellenstoßes



## Untersuchung der Dauerhaftigkeit der Spritzverzinkung

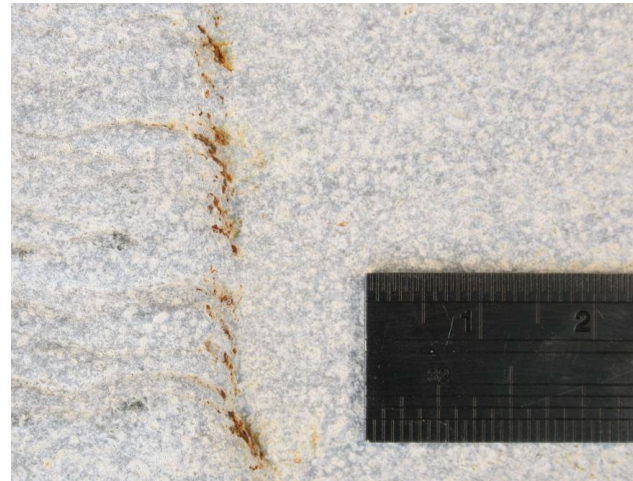


## Ergebnis der forcierten Bewitterung im Labor



**Ziel:**  
**Identifikation**  
**von Schwach-**  
**stellen**

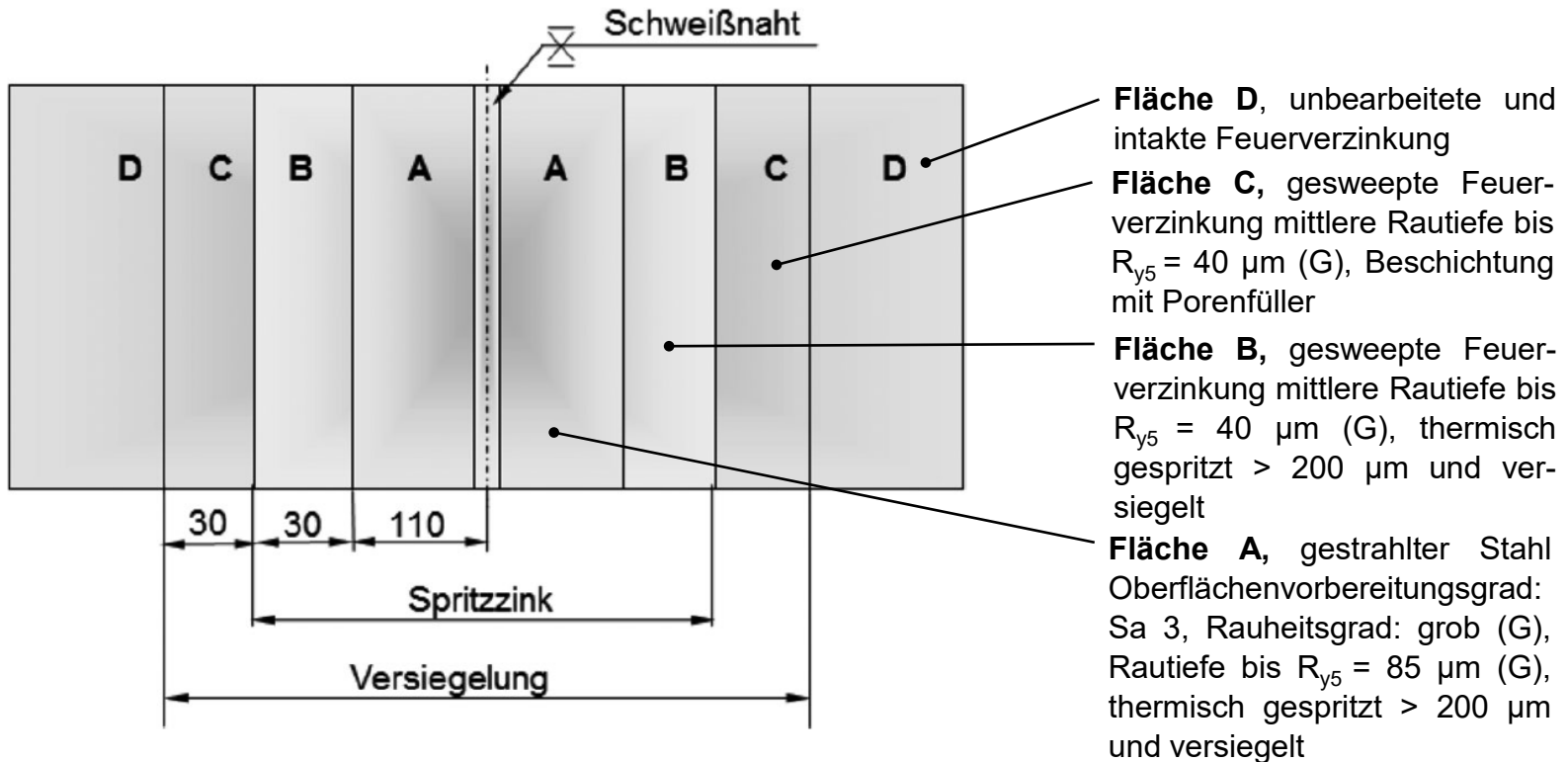
Überlappungs-  
zone von Spritz-  
und Feuerver-  
zinkung



Fehler der  
Spritzverzinkung  
im Bereich der  
gewölbten  
Schweißnaht  
(Spritzschatten)

Quelle: IKS Dresden GmbH

## Ausführung von geschweißten Montagegestößen



ZnAl15 (DIN EN ISO 2063), Verarbeitung durch Flamm- oder Lichtbogenspritzen + Versiegelung (ZTV ING / DIN EN 1090-2)

→ **Erwartete Schutzdauer  $\geq$  Schutzdauer organische Beschichtung (30 Jahre)**

→ **Hoher Herstellungsaufwand und kein gleichwertiger Korrosionsschutz gegenüber der Feuerverzinkung**

## Ausführung von geschraubten Montagegestößen

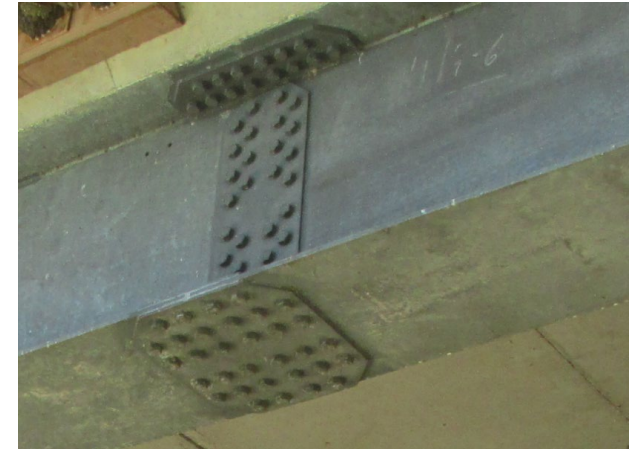
- Alle Bauteile erhalten durch die Feuerverzinkung einen lebenslangen Korrosionsschutz
- Geschraubter Laschenstoß mit Passschrauben oder gleitfest vorgespannten Verbindungen
- Vorteil gleitfest vorgespannte (GV) Verbindungen gegenüber Passschrauben: Höhere Ermüdungsfestigkeit und einfachere Montage

- Gleitwiderstand  $F_{s,Rd}$  (DIN EN 1993-1-8): 
$$F_{s,Rd} = \frac{\mu * F_{p,C}}{\gamma_{M3}}$$

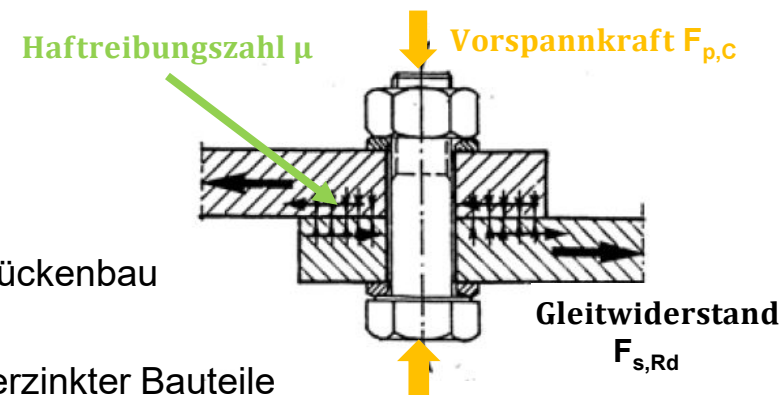
- Haftreibungszahl  $\mu$  (DIN EN 1090-2, Tab. 17) beschreibt quantitativ die Qualität der Reibfläche  
→ Haftreibungszahlen für feuerverzinkte Oberflächen gelten für Zinkschichtdicken des Hochbaus ~ 100  $\mu\text{m}$

### Offene Fragen:

- Haftreibungszahlen für feuerverzinkte Oberflächen im Brückenbau mit Zinkschichtdicken  $\gg 100 \mu\text{m}$
- Ermüdungsfestigkeit geschraubter Verbindungen feuerverzinkter Bauteile



Geschraubter Laschenstoß  
Quelle: Voigt & Schweitzer GmbH & Co.KG



## Untersuchung geschraubter feuerverzinkter Verbindungen für den Brückenbau

### Haftreibung feuerverzinkter Oberflächen:

- Haftreibungswert feuerverzinkter Oberflächen wird maßgeblich durch das zeitabhängige Kriechen bestimmt
- Teilweise erhöhte Kriechneigung bei erhöhten Schichtdicken
- Haftreibungszahlen aus DIN EN 1090-2, Tabelle 17 für feuerverzinkte Oberflächen müssen für Anwendung im Brückenbau aufgrund erhöhter Schichtdicke von 250 µm reduziert werden
  - **Gleitklasse B** - Feuerverzinkt & gesweept & ASI-Beschichtet:  
 $\mu = 0,40 \rightarrow \mu = 0,30$
  - **Gleitklasse C** - Feuerverzinkt & gesweept:  
 $\mu = 0,35 \rightarrow \mu = 0,25$



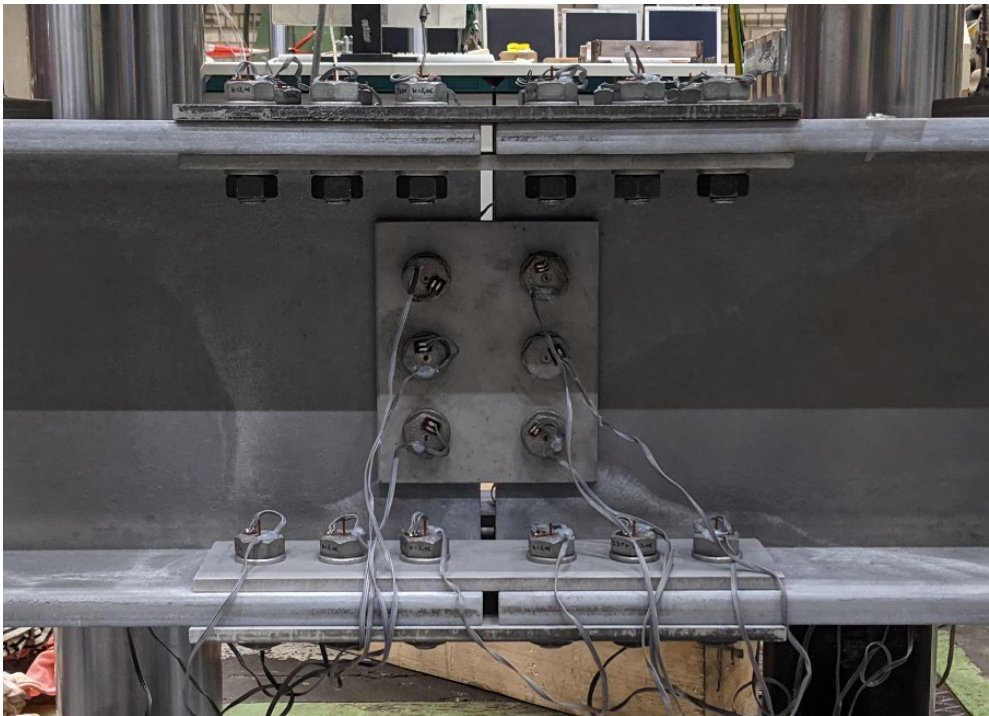
Quelle: TU Dortmund

### Ermüdungsfestigkeit:

- Teilweise ist nur ein geringer Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit feststellbar
- Zugehöriger Kerbfall 112 kann bestätigt werden

## Untersuchung geschraubter feuerverzinkter Verbindungen für den Brückenbau

- Optimale Oberflächen für den Brückenbau aufgrund geringer Vorspannkraftverluste & geringem Bearbeitungsaufwand:
  - Brückenträger: Normaltemperatur-Verzinkt ( $\sim 450^{\circ}\text{C}$ ), keine weitere Bearbeitung
  - Laschen: Gestrahlte Oberfläche & Hochtemperatur-Verzinkt ( $\geq 560^{\circ}\text{C}$ )



Quelle: TU Dortmund

Brückenträger

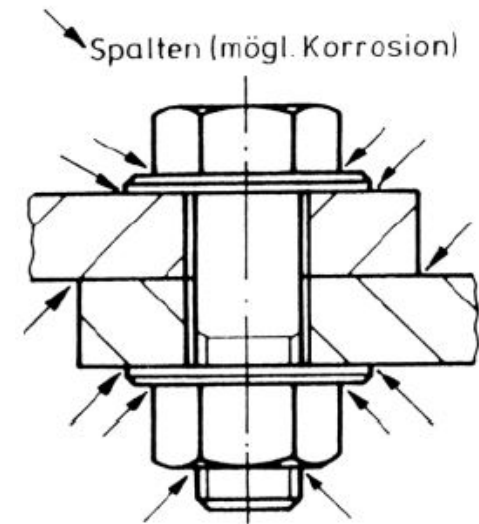


Lasche

Quelle: TU Dortmund

## Vermeidung von Spaltkorrosion durch Dichtstoffe

- Gefahr von Spaltkorrosion in salzhaltigen Atmosphären
  - Untersuchungen unter natürlicher und forcierter Freibewitterung an gefügten Proben mit und ohne Dichtstoff
  - Einsatz von Dichtstoffen in stark salzhaltigen Atmosphären der Fuge erforderlich
  - Verminderte Korrosion durch Dichtstoffe auch bei nicht bis wenig salzhaltigen Atmosphären
- **Katalog für empfohlene Dichtstoffe**



Mögliche Angriffspunkte für Spaltkorrosion  
Quelle: TAW-Verlag



Probe für Simulation eines Laschenstoßes mit abgedichteten Fugen  
Quelle: IKS Dresden GmbH

## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- Motivation und Forschungsanlass
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
- Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
- Ausführung von Montagestößen
- **Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen**
- Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
- Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken
- Ausblick auf kommende Forschungsthemen



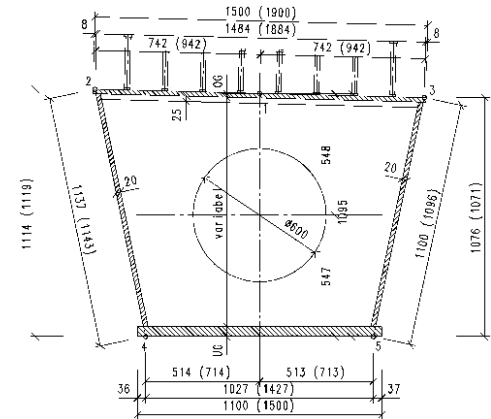
## Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen

Kleine Hohlkästen werden dichtgeschweißt und von außen mit einer organischen Beschichtung vor Korrosion geschützt. Die innenliegenden Oberflächen erhalten keinen gleichwertigen Korrosionsschutz. Ist bei einer feuerverzinkten Ausführung der Schutz aller Oberflächen möglich?

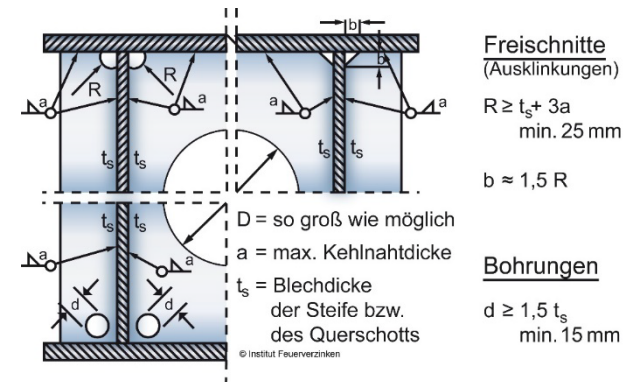
### Offene Fragestellungen:

- Wie muss feuerverzinkungsgerecht konstruiert werden?
- Zulauf- und Entlüftungsöffnungen sind für die Feuerverzinkung notwendig
  - Größe und Position der Öffnungen?
  - Einfluss auf die statischen Anforderungen?
- Bleiben nach dem Feuerverzinken Verformungen zurück?

**Regelwerke:** DIN EN ISO 14713-2 & DAST-Richtlinie 022



Querschnitt einer Verbundbrücke mit kleinem Hohlkasten  
Quelle: PSP Ingenieure Dortmund



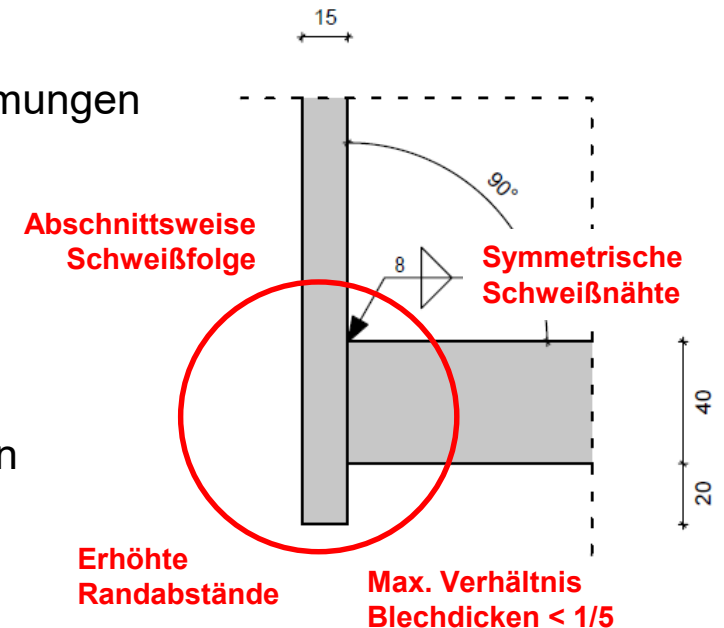
Vorgaben zu Durchflussöffnungen für das Feuerverzinken  
Quelle: Institut Feuerverzinken

## Feuerverzinkungsgerechte Konstruktion eines Kasten-Querschnitts

**Ziel:** Vermeidung von zu hohen Eigenspannungen die sich mit zusätzlichen Spannungen bei Erwärmung der Bauteile überlagern

Hinweise nach DAST-Richtlinie 022:

- **Maximales Verhältnis Blechdicken  $< 1/5$** 
  - Vermeidung von stark ungleichmäßigen Erwärmungen
- **Symmetrische Schweißnähte** bei großen Blechdicken Unterschieden
  - Reduzierung von Schrumpfmomenten
- **Abschnittsweise Schweißfolge** in Längsrichtung
  - Reduzierung von Längs- & Querschrumpfungen
- **Erhöhte Randabstände** zw. Blechkanten und Schweißnähten
  - Vermeidung Addition von Eigenspannungen aus thermischem Trennen und Schweißen

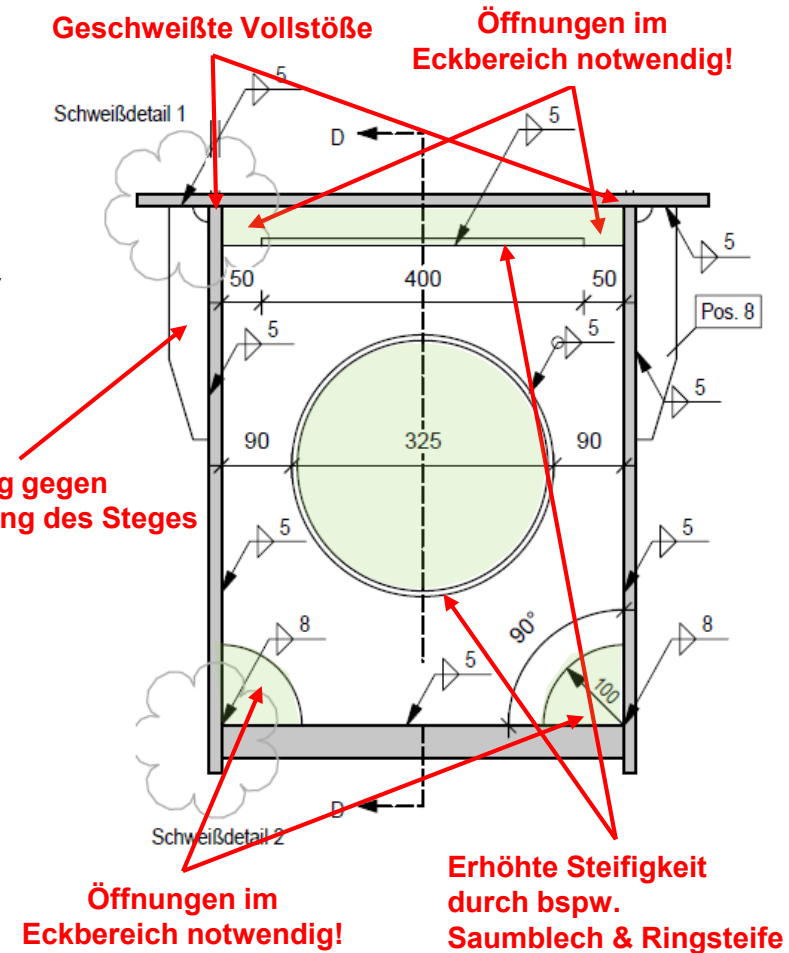


Verzinkungsgerechte Konstruktion  
Untergurt Kasten-Querschnitt

## Vermeiden von Fehlstellen

**Ziel:** Sicherstellen einer gleichmäßigen Feuerverzinkung aller Oberflächen und Abfluss des flüssigen Zinks beim Auftauchen

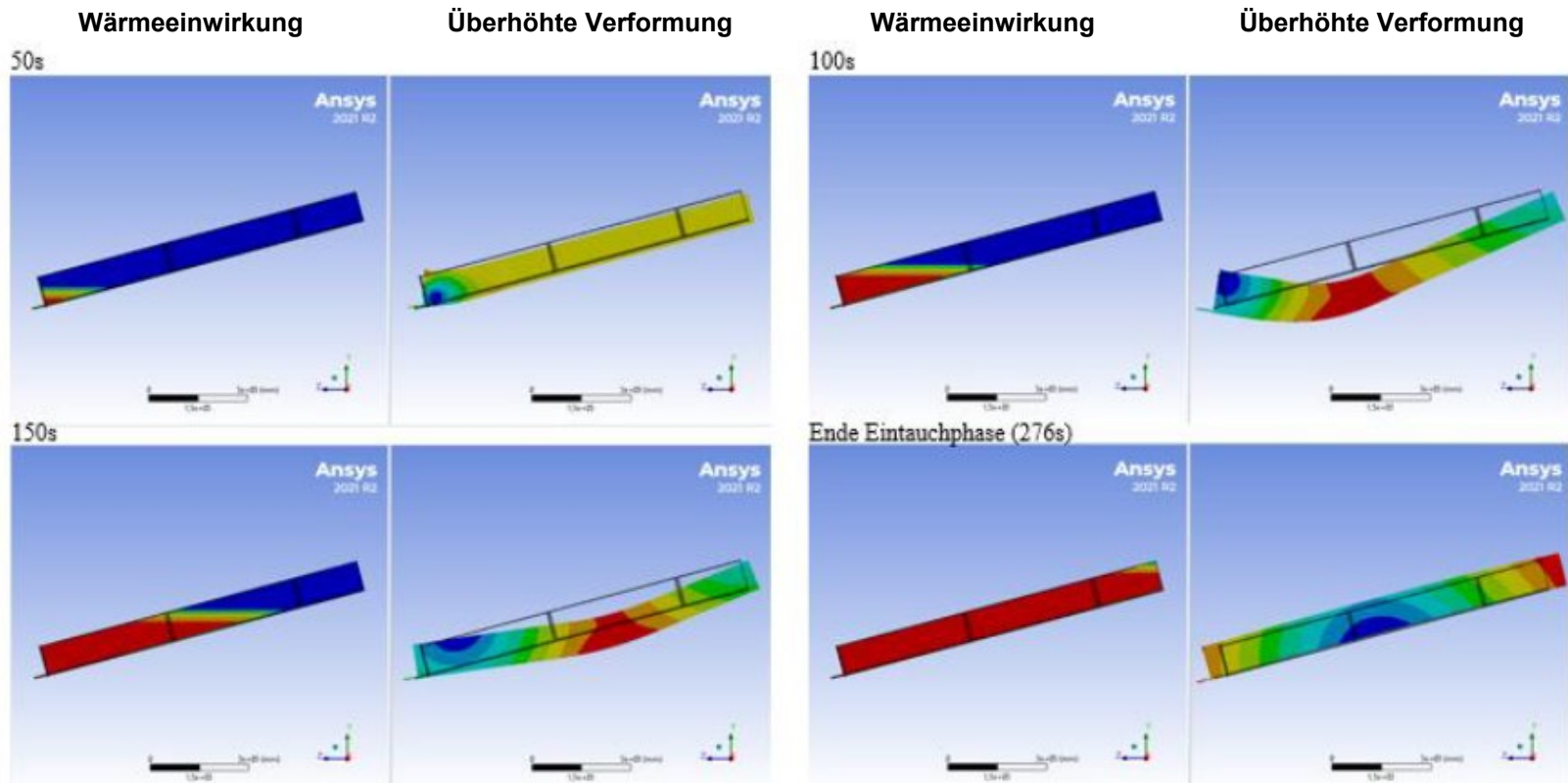
- Quer- und Endschotte müssen mit **Öffnungen** für Zulauf und Entlüftung versehen werden (Werden auf Baustelle ggf. Verschlussen)
- **Öffnungen im Eckbereich** notwendig!
- Vergrößerter Spalt (Eigentlich maximal zulässig nach Richtzeichnungen ZTV-ING: 2 mm)
- **Zusätzliche Versteifung** für **Querbiegung des Steges** notwendig
- Zusätzliche **Versteifung der Schotts** notwendig
- Verschließen von einseitig zugängigen Stoßstellen der Bleche durch **geschweißte Vollstöße**



Querschnitt eines kleinen Hohlkastens unter Berücksichtigung der feuerverzinkten Ausführung

## Plastische Verformungen durch Erwärmung

Bleiben nach dem Verzinken plastische Verformungen aus der Erwärmung des stark querversteiften Querschnitts zurück?



Exemplarische numerische Simulation der Erwärmung während des Feuerverzinkens mit zugehöriger Verformung zu unterschiedlichen Zeitpunkten

## Untersuchung am Großteilversuch



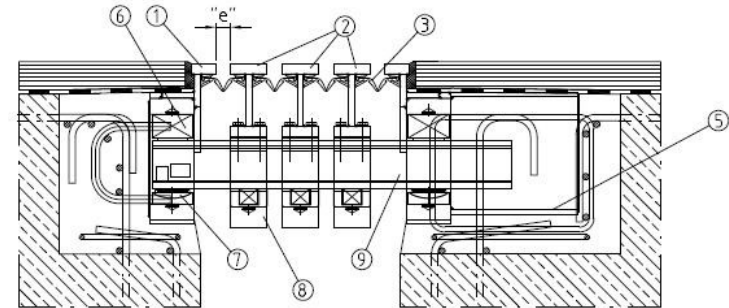
**Untersuchung von Verformungen und Rissfreiheit am Großteilversuch**

## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- Motivation und Forschungsanlass
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
- Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
- Ausführung von Montagestößen
- Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
- **Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge**
- Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken
- Ausblick auf kommende Forschungsthemen

## Korrosionsschutz

- Auslegung der **Lebensdauer** nach ZTV-ING und EAD 120113-00-0107 auf **bis zu 50 Jahre**
- Erfahrungsgemäß wird die Schutzdauerklasse „Hoch“ (> 15 Jahre) gemäß DIN EN ISO 12944-5 mit den organischen Beschichtungen nach ZTV-ING 4-3, Anhang A, Tabelle A 4.3.2 häufig nicht erreicht.
- Durch die Verwendung feuerverzinkter Ausführungen und solcher in Hybridbauweise kann die Lebensdauer von 50 Jahren erreicht werden.
- **Für die Anwendung fehlen** allerdings noch:
  - Die Überprüfung der Konstruktionsdetails und Bestimmung der zugehörigen **Kerbfälle** in Erweiterung der DIN EN 1993-1-9.
  - Untersuchungen zu **Mikroklimata** im Bereich der modularen Fahrbahnübergänge zur Festlegung der erforderlichen Zinkschichtdicke für eine 50 jährige Korrosionsschutzdauer.



Quelle: ETAG 032 – Teil 8

## Korrosionsschutz & Ausblick

- Für eine Korrosionsschutzdauer von 50 Jahren bei **Sebistystählen** sind mit den Korrosionsraten gemäß DIN EN ISO 9223 Schichtdicken **> 240 µm** erforderlich
- Für **Hochsiliziumstähle** sind aufgrund des abweichenden Schichtaufbaus etwa **315 µm** erforderlich
- Die Bestimmung der **Korrosivitätskategorie** im Bereich von modularen Fahrbahnübergängen findet durch Auslagerungen von Prüfkörpern an drei verschiedenen Übergangskonstruktionen statt
- Empfehlungen für **Prozessparameter** zur Erzielung der gewünschten Zinkschichtdicken bei Sebisty- und Hochsiliziumstählen werden ausgesprochen
- Durchführung **zyklischer Versuche** zur Prüfung maßgebender Kerbdetails an feuerverzinkten und hybriden Lamellenträgern
- Ausarbeitung von Empfehlungen zur verzinkungsgerechten Ausführung modularer Dehnfugen-Konstruktionen



## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- Motivation und Forschungsanlass
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
- Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
- Ausführung von Montagestößen
- Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
- Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
- **Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken**
- Ausblick auf kommende Forschungsthemen

## Ausgewählte ausgeführte feuerverzinkte Brücken

BAB 44 bei Kassel



Erfahrungsbericht:  
Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Heft B 170



Quelle: Korrosionsschutz – Feuerverzinken, Beuth Verlag

Rurbrücke Grünental bei Monschau



Elsterbrücke Osendorf

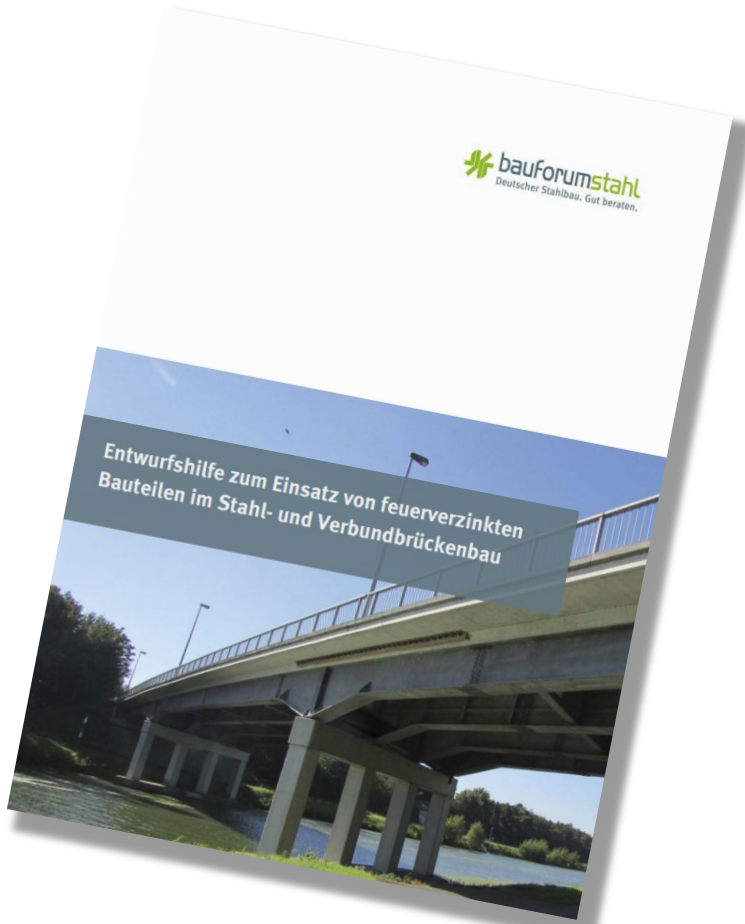
Quelle: SSF Ingenieure

Im Bereich der Bundesautobahn durch Erteilung einer Zustimmung im Einzelfall

Quelle: Claus Queck GmbH

**In den letzten Jahren wurden einige Brücken in feuerverzinkter Bauweise ausgeführt!**

## Arbeitshilfen und Merkblätter zu feuerverzinkten Brücken



Entwurfshilfe für feuerverzinkte Brücken  
bauforumstahl



Erfahrungsbericht feuerverzinkte Brücke A44 bei Kassel  
Bericht B 170 – BAST Bundesanstalt für Straßenwesen

## Ermüdungsbeanspruchte, feuerverzinkte Stahlkonstruktionen

- Motivation und Forschungsanlass
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
- Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
- Ausführung von Montagestößen
- Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
- Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
- Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken
- **Ausblick auf kommende Forschungsthemen**

## Offene Fragestellungen

- Einfluss von Mikrostruktureffekten der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit
  - Charakterisierung von Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
- Erzielung erhöhter Haftreibungszahlen von gleitfest-vorgespannten Verbindungen mit feuerverzinkten Oberflächen
  - Erhöhte Haftreibungszahlen durch Einsatz von Friction Shims in den Gleitfugen

## Danksagung

Die IGF-Forschungsprojekte FOSTA P835 (IGF-Nr. 351/ZBG), FOSTA P1042 (IGF-Nr. 18624 N), FOSTA P1574 (IGF-Nr. 22524 BG) der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) sowie die beiden GAV-Projekte (IGF-Nr. 19444 BG & IGF-Nr. 20824 N) des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V. (GAV) wurden / werden mit finanzieller Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V. (AiF) Köln und Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz durchgeführt. Ebenso wurde das INNO-KOM-Ost Forschungsprojekt MF130088 mit finanzieller Unterstützung der EuroNorm GmbH und Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz durchgeführt.



Forschungsvereinigung  
Stahlanwendung e. V.



Vielen Dank an diese unterstützenden Gremien. Ebenfalls vielen Dank an den Gemeinschaftsausschuss Verzinken e. V. (GAV), die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), dem Deutschen Ausschuss für Stahlbau (DASt) und die EuroNorm GmbH für die Betreuung und Unterstützung. Darüber hinaus geht ein herzlicher Dank an die Projektpartner, die beteiligten Industrieunternehmen und die Projektbegleitenden Ausschüsse aller Projekte für ihre Unterstützung.

# Feuerverzinken im Brückenbau - Neue Entwicklungen



## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Technische Universität Dortmund  
Lehrstuhl Stahlbau

**Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann**

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Bettina Brune

Peter Hatke, M.Sc.

Johannes Grote, M.Sc.

Michael Diener, B.Sc.



Technische Universität Darmstadt  
MPA / IfW Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Dr.-Ing. Marcus Klein

Dipl.-Ing. Anna-Katharina Kraemer



Institut für Korrosionsschutz  
Dresden GmbH

Dr.-Ing. Susanne Friedrich

Dipl.-Ing. (FH) Peter Lebelt