

GAV-Forschungskolloquium 2023

Forschungsprojekte IGF 351 Z / 19444 / 20824 / 22524

# Einsatz von feuerverzinkten Brücken unter Ermüdungsbeanspruchungen



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, M.Sc.



Technische Universität Darmstadt  
MPA / IfW Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner  
Dr.-Ing. Marcus Klein  
Dr.-Ing. Anna-Katharina Kraemer



Institut für Korrosionsschutz  
Dresden GmbH

Dr.-Ing. Susanne Friedrich  
Dipl.-Ing. (FH) Peter Lebelt

# Einsatz von feuerverzinkten Baustählen im Verkehrsbrückenbau unter Ermüdungsbeanspruchungen

---

## 1. Motivation und Forschungsanlass

---

2. Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
3. Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
4. Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
5. Ausführung von Montagestößen
6. Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
7. Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
8. Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken

## Motivation und Forschungsanlass

## Motivation

- 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



#### Zinkschichtdicke:

1945 fvz ausgeführt  
2007 69 - 219  $\mu\text{m}$   
2014 zus. Beschichtung  
→ Duplex-System

Quelle: Jan Draijer

#### Stainsby-Hall, 1974, Großbritannien



#### Zinkabtrag:

1974 fvz ausgeführt  
1996 65% übrig  
2004 55% übrig  
2015 45% übrig  
60  $\mu\text{m}$  unter  
Salzablagerung

Quelle: Industrieverband Feuerverzinken e.V.

## Motivation und Forschungsanlass

### Motivation

#### Gründe für bisher fehlende Anwendung:

- Fehlende Beurteilung des Korrosionsschutzverhaltes der Feuerverzinkung unter den spezifischen Bedingungen des Brückenbaus
- Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit noch unklar, wissenschaftliche Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten fehlten
- Unsicherheiten hinsichtlich der Feuerverzinkung großer Brückenträger

#### Ziel der Untersuchungen:

- Ist ein lebenslanger Korrosionsschutz durch Feuerverzinken möglich?
- Wird die Ermüdungsfestigkeit durch die Feuerverzinkung beeinflusst?
- Welche konstruktiven Besonderheiten sind bei der Feuerverzinkung zu beachten?

# Einsatz von feuerverzinkten Baustählen im Verkehrsbrückenbau unter Ermüdungsbeanspruchungen

1. Motivation und Forschungsanlass

---

2. Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau

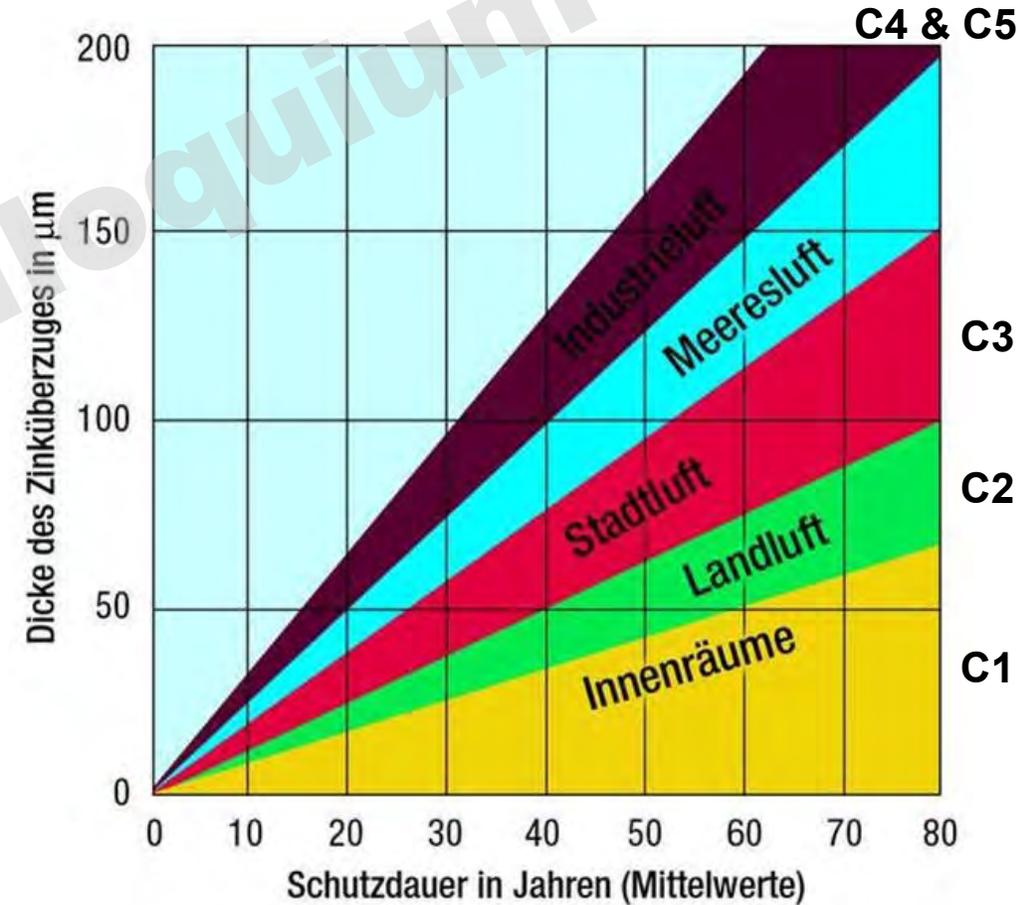
---

3. Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
4. Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
5. Ausführung von Montagestößen
6. Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
7. Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
8. Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken

## Schutzdauer einer Feuerverzinkung

- Die 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

## Korrosionsschutz



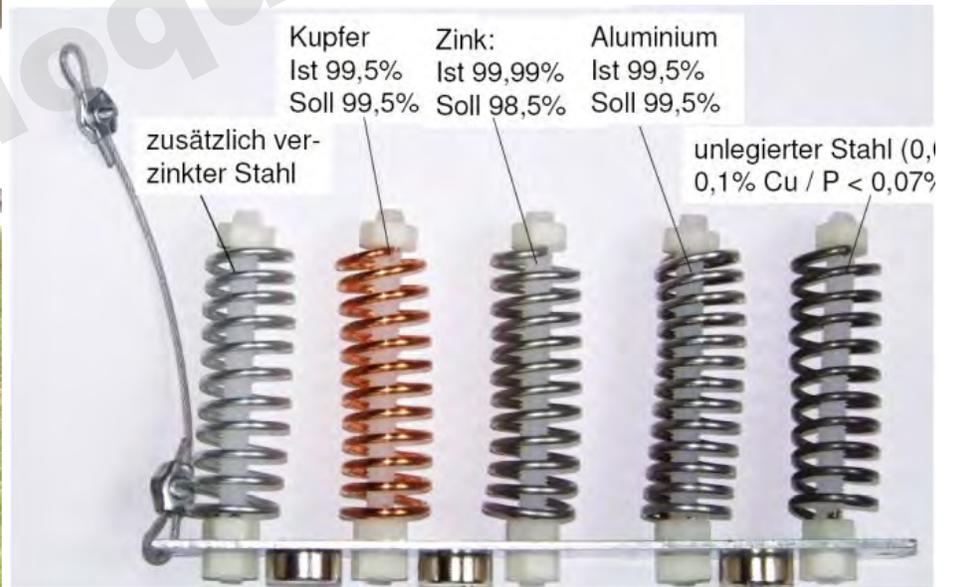
Quelle: Handbuch Feuerverzinken

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

## Korrosionsschutz



**Beispiel:**  
Brücke über die 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

## Korrosionsschutz

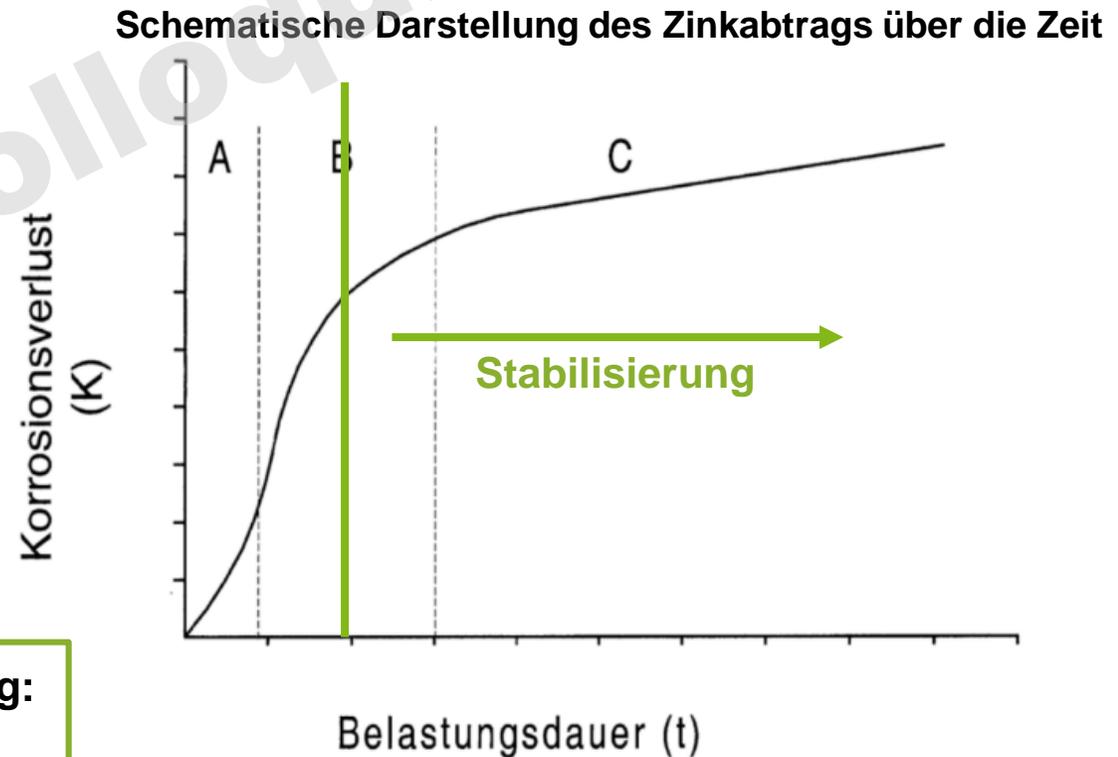
Der höchste Zinkabtrag wurde nach einem Jahr an einer Brücke über die A4 in Thüringen gemessen:

- $r_{corr/zink} = 2.65 - 4.11 \mu m$  (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)

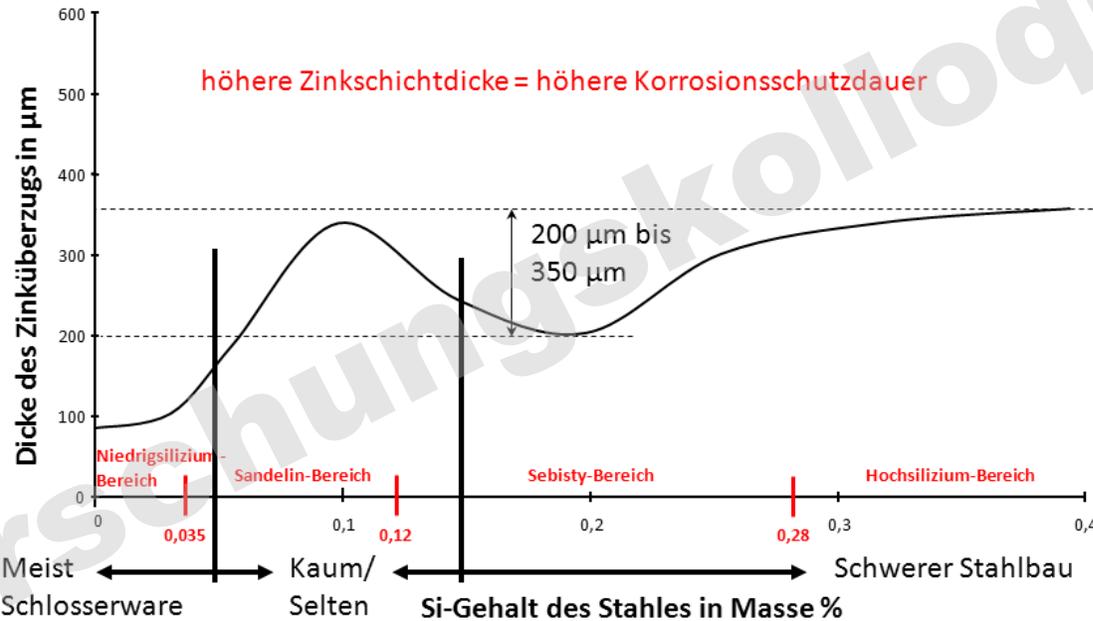
→ **Entscheidender Einflussfaktor für den tatsächlichen Zinkabtrag: Mikroklima, bspw. im Bereich von Tausalzsprühnebel**



## Zusammenfassung zum Korrosionsschutz durch Feuerverzinken

## Korrosionsschutz

- Eine **100-jährige Schutzdauer** erfordert eine Schichtdicke von **147 –252 µm** (Korrosivitätskategorie C4)
- **Schichtdicken > 200 µm** sind mit den üblichen Baustählen (Sebistybereich) **problemlos erreichbar**



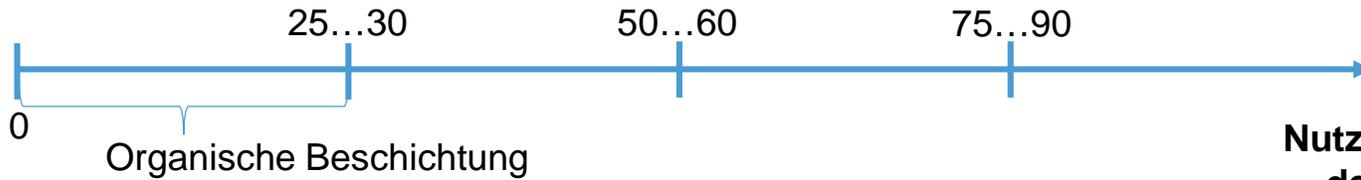
Quelle: Thiele, M. et al. GAV Bericht 158

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

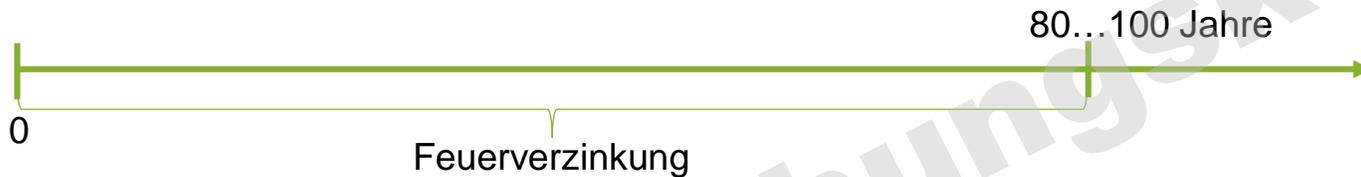
## Vergleich Schutzdauer & Kosten: Organische Beschichtung – Feuerverzinkung

## Korrosionsschutz

### Theoretische Schutzdauer organische Beschichtung

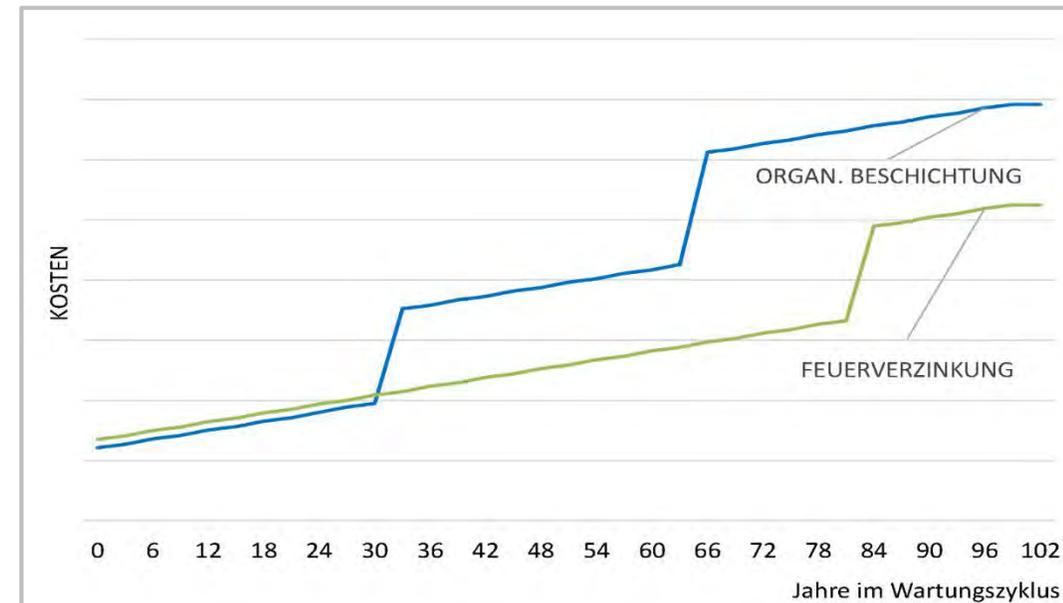


### Theoretische Schutzdauer Feuerverzinkung



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

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



# Einsatz von feuerverzinkten Baustählen im Verkehrsbrückenbau unter Ermüdungsbeanspruchungen

1. Motivation und Forschungsanlass
2. Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau

---

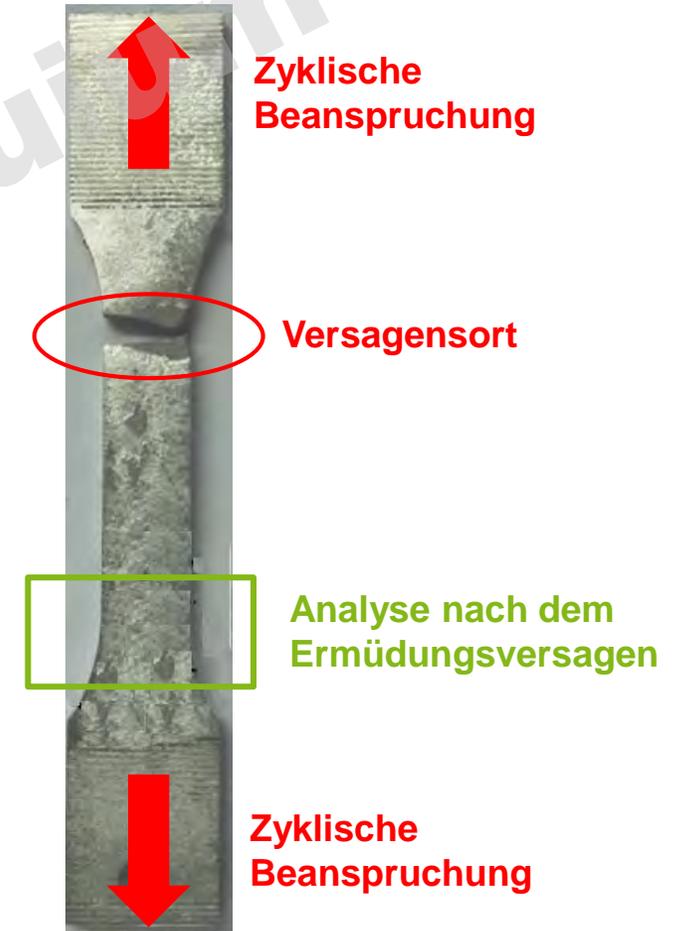
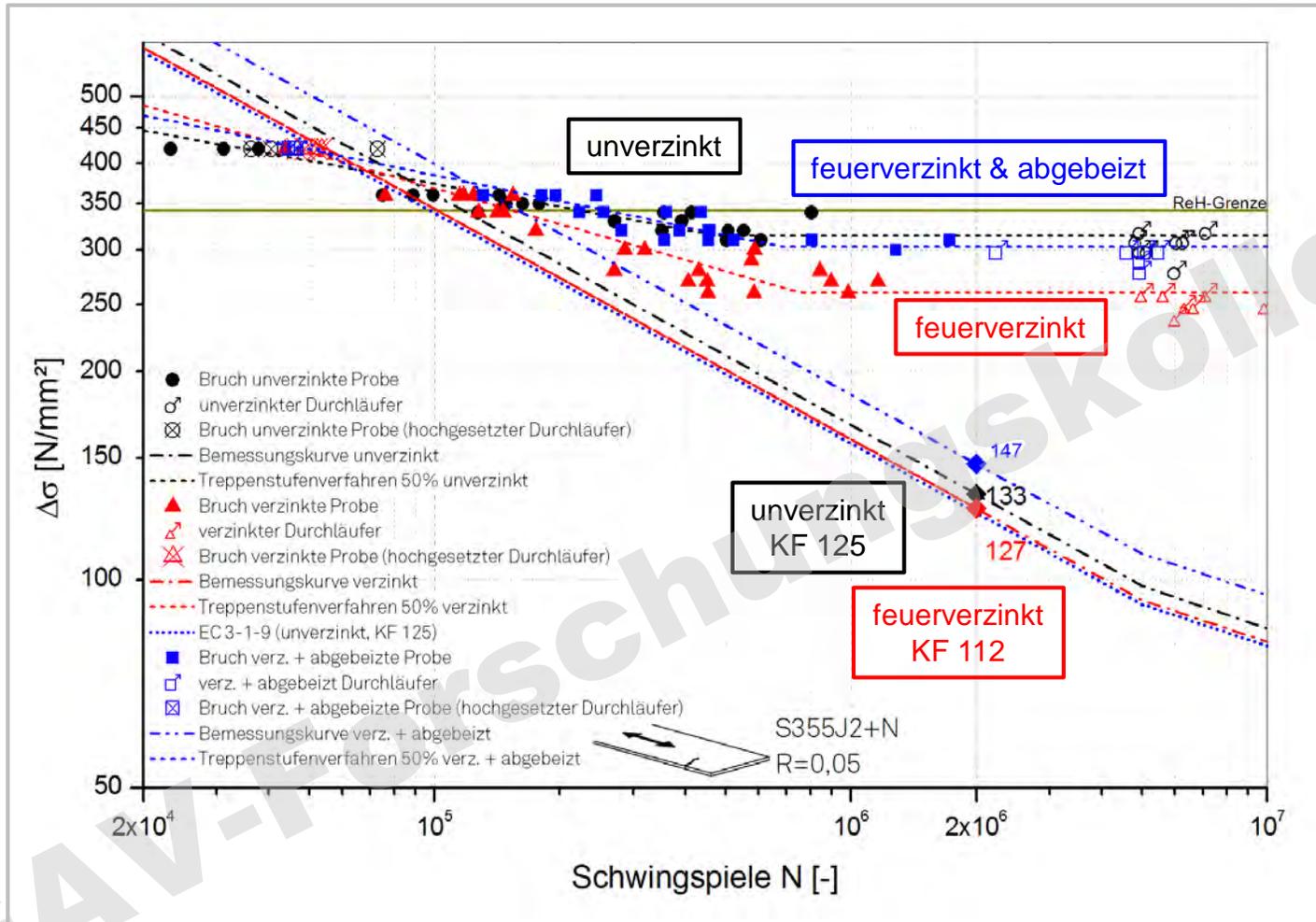
## 3. Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details

---

4. Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
5. Ausführung von Montagestößen
6. Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
7. Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
8. Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken

# Versuche an Kleinteilproben mit unterschiedlichen Oberflächen

Ermüdung



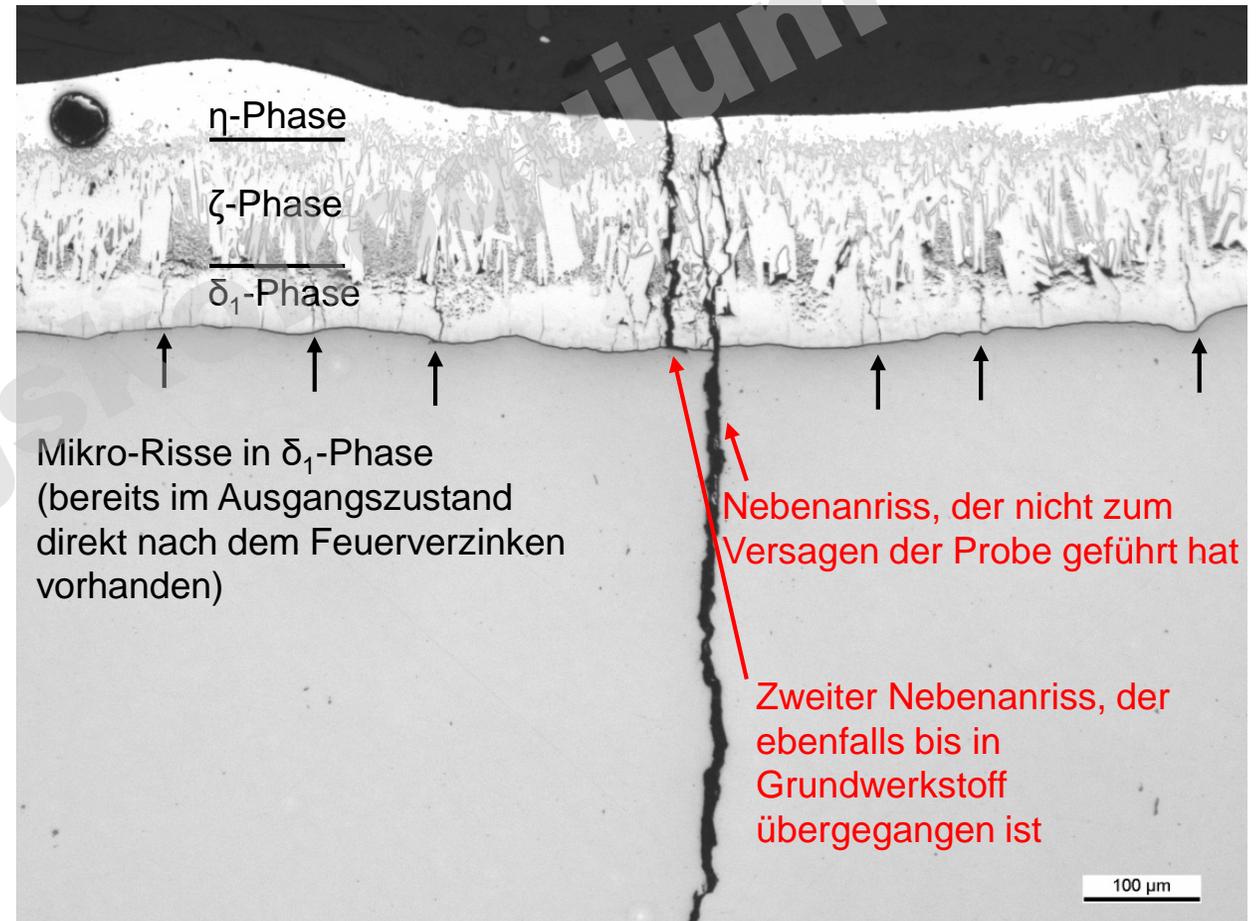
## Analyse von feuerverzinkten Kleinteilproben nach Ermüdungsversagen

Ermüdung

### Erkenntnisse:

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

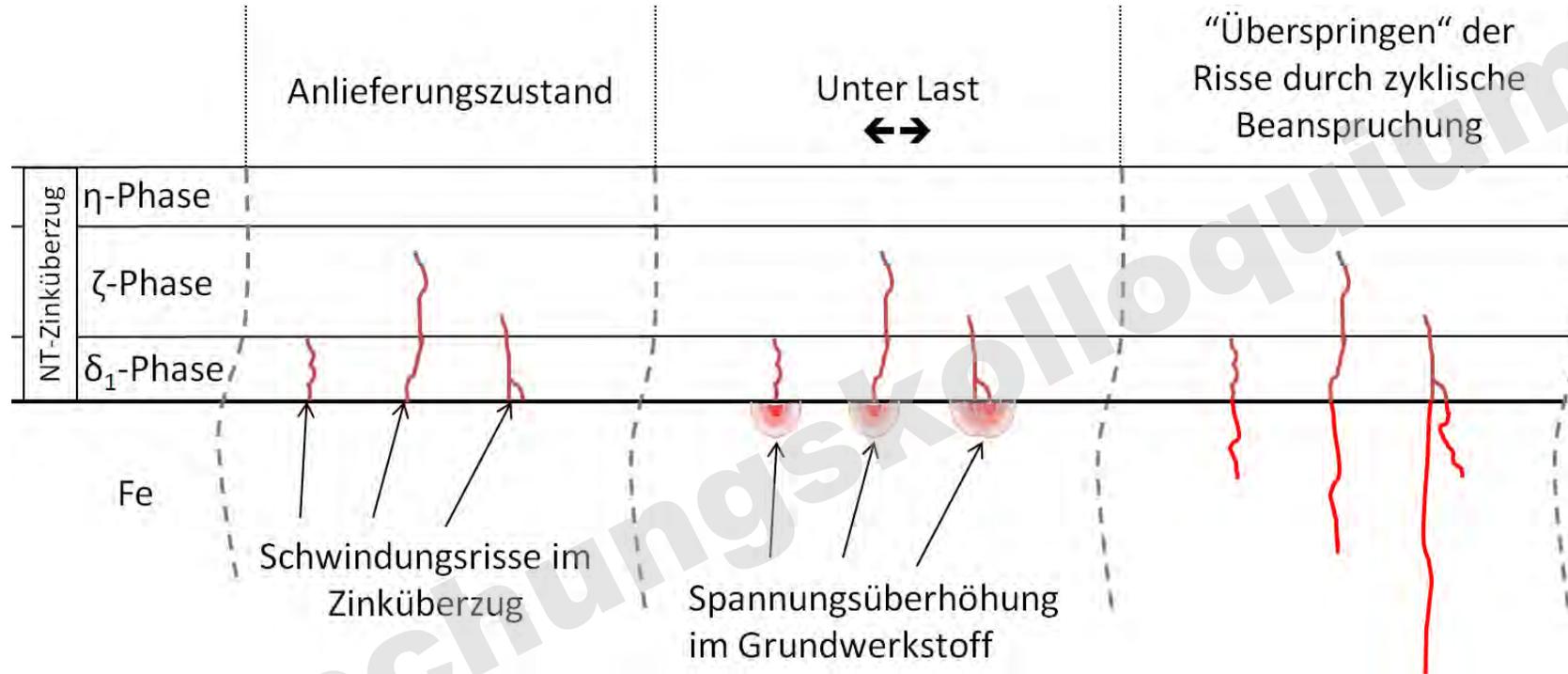
- **Ursache:** Im Feuerverzinkungs-Prozess entstehen Mikrorisse im Überzug, die in das Grundmaterial wachsen können.



Quelle: MPA Darmstadt

## Hypothese zur Rissinitiierung

Ermüdung



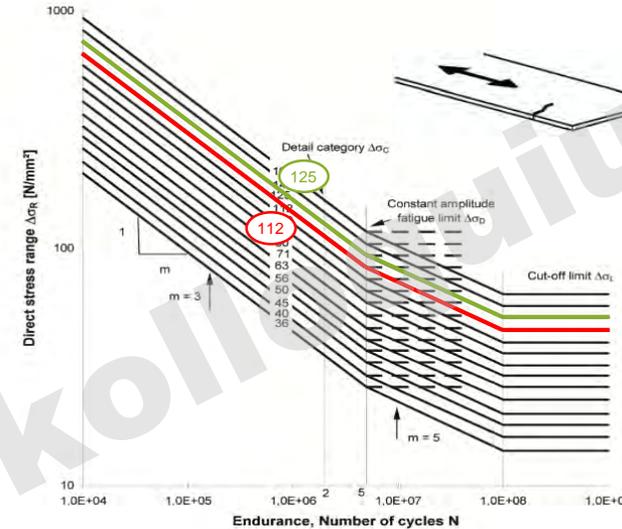
### Hypothesen:

- 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

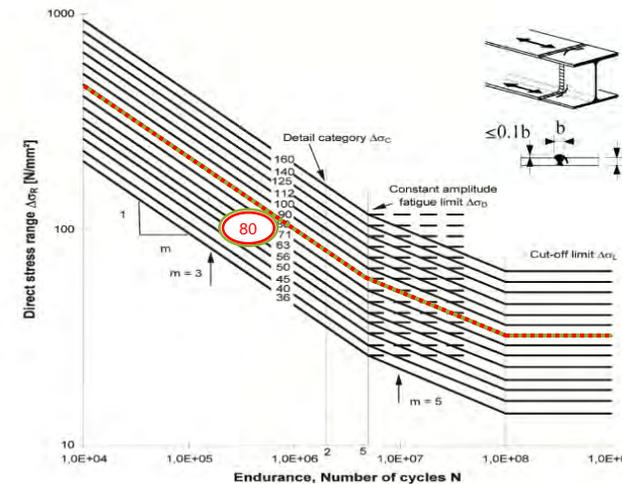
# Fazit der Untersuchungen der Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Bauteile

## Ermüdung

- 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, der Einfluss des Zinküberzugs ist vernachlässigbar
- Einfluss der Feuerverzinkung auf Ermüdungsfestigkeit niedrigerer Kerbfälle ist aktueller Gegenstand weiterer Untersuchungen



unverzinkt  
 feuerverzinkt ↓



unverzinkt = feuerverzinkt →

## Integration feuerverzinkter Kerbfälle in die prEN1993-1-9, 2023

## Ermüdung

- 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)

### Bemessungsnorm DIN EN 1993-1-9:2010

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;</b>  <b>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 1993-1-8/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 18800-1:2006-11;                      Ersatz für DIN EN 1993-1-9 Berichtigung 1:2009-12</p>		
Gesamtumfang 43 Seiten		
Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN		

Nennmaß: Blatt 2/17-12

© 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.  
 Alleinverkauf der Normen durch Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin

Preisgruppe 17  
 www.din.de  
 172260



Quelle: Beuth-Verlag

# Integration feuerverzinkter Kerbfälle in die prEN1993-1-9

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

prEN 1993-1-9:2021 (E)

Table 10.1: Plain members

Detail category	Constructional detail	Description	Supplementary Requirements
180 m1 = 5		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	①, ②, ③: 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: ①: Class A3 acc. to EN 10163-2. ②: Option 1.5 acc. to EN 10210
160 m1 = 5			①, ②, 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: ①: Class A3 acc. to EN 10163-2. ②: Class C3 acc. to EN 10163-3. ③: Option 1.5 acc. to EN 10210
125 m1 = 5			①, ②, ③: 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 m1 = 5		Sheared or thermally cut material subject to normal stress: ④ with subsequent grinding; ⑤ with subsequent deburring	④ Mean surface roughness depth after grinding in the order of mill scale ( $R_z \leq 200 \mu\text{m}$ ). Repair by welding not allowed. ⑤ 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.
125 m1 = 5			Repair by welding followed by grinding until a smooth transition is achieved.

For ① to ⑤ 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 ③ made of weathering steel the next lower detail category of Figure 8.1 should be used, but not higher than Detail Category 140.  
For ④ to ⑤ 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

# Einsatz von feuerverzinkten Baustählen im Verkehrsbrückenbau unter Ermüdungsbeanspruchungen

1. Motivation und Forschungsanlass
2. Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
3. Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details

---

## 4. Verbunddübelleisten zur Schubübertragung

---

5. Ausführung von Montagestößen
6. Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
7. Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
8. Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken

## 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 abhängig von Herstellung, Nachbearbeitung und Feuerverzinkung
- FOSTA Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit  
RWTH Aachen – Institut für Stahlbau und Leichtmetallbau  
Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann

## Verbunddübelleisten



Feuerverzinkte Verbunddübelleiste

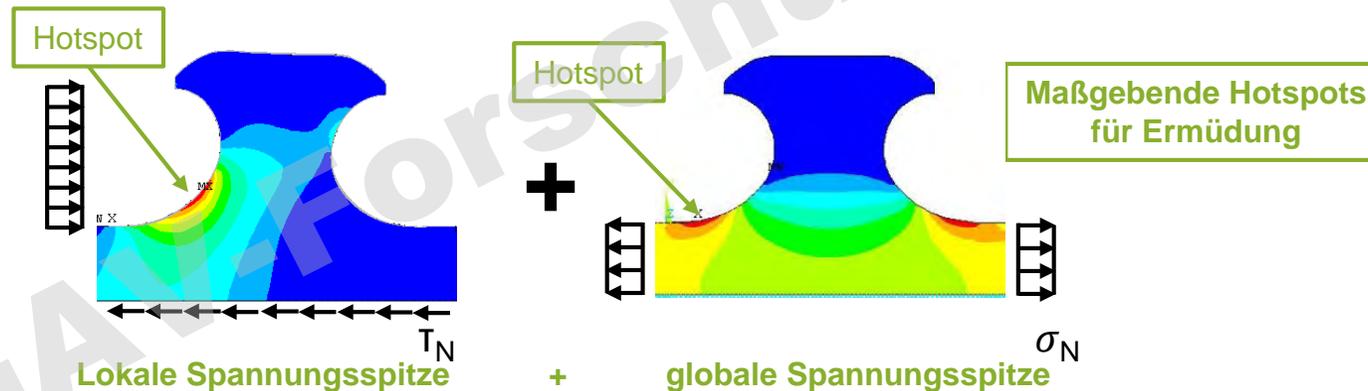


Visualisierung der PreCoBeam-Bauweise  
Quelle: Elsterbrücke Osendorf, Ernst & Sohn

## Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Verbunddübelleisten

## Verbunddübelleisten

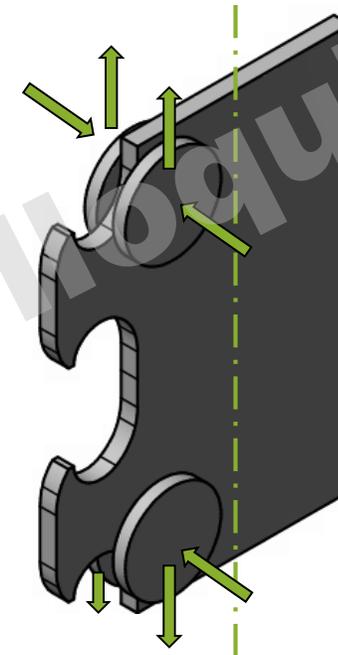
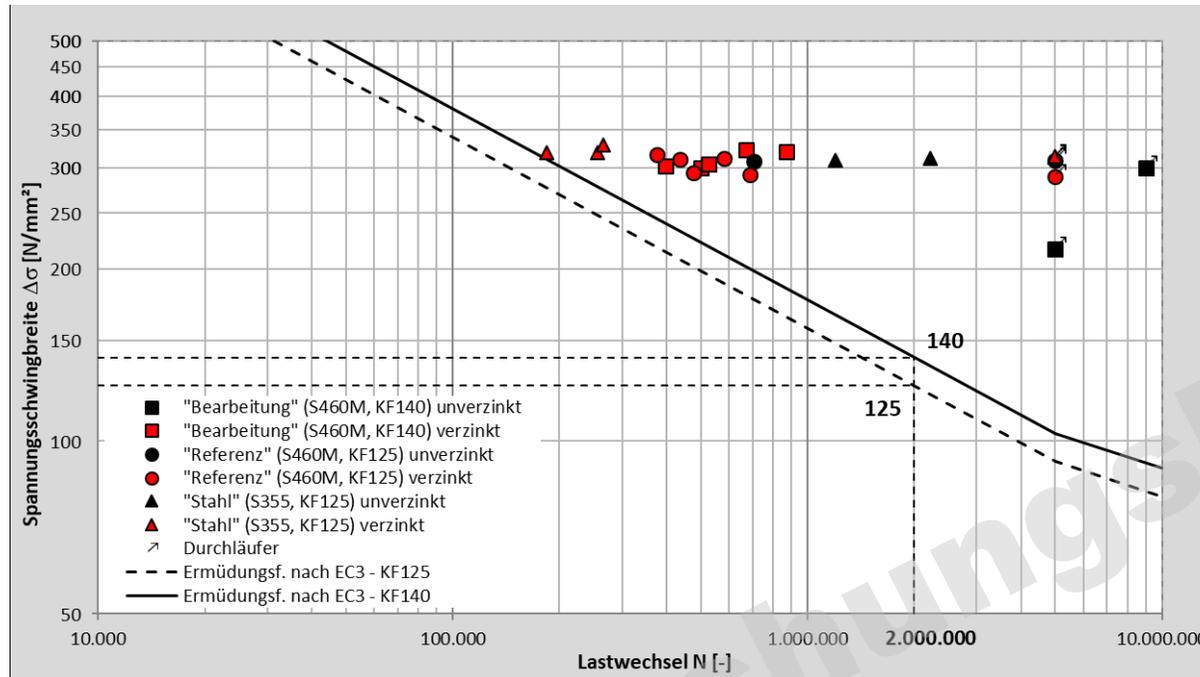
- Herstellung meist mittels thermischer Trennung
- Ggf. nachträgliches Beschleifender Schnittkante zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit unverzinkt
  - Kerbfall 125 ohne nachträgliche Bearbeitung
  - Kerbfall 140 mit nachträglicher Bearbeitung
- Ermüdungsfestigkeit von VDL von lokalen und globalen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



Herstellung von Verbunddübelleisten  
Quelle: ArcelorMittalEurope

## Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Verbunddübelleisten

## 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)

# Einsatz von feuerverzinkten Baustählen im Verkehrsbrückenbau unter Ermüdungsbeanspruchungen

1. Motivation und Forschungsanlass
2. Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
3. Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
4. Verbunddübelleisten zur Schubübertragung

---

## 5. Ausführung von Montagestößen

---

6. Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
7. Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
8. Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken

## Ausführung von Montagestößen

## Montagestöße

- Begrenzte Abmessungen der Verzinkungsbecken (Länge ca. 16 – 19 m, Breite und Tiefe ca. 2,0 – 3,0 m) 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

## Montagestöße



Sandstrahlen der Schweißnaht



Spritzverzinkung



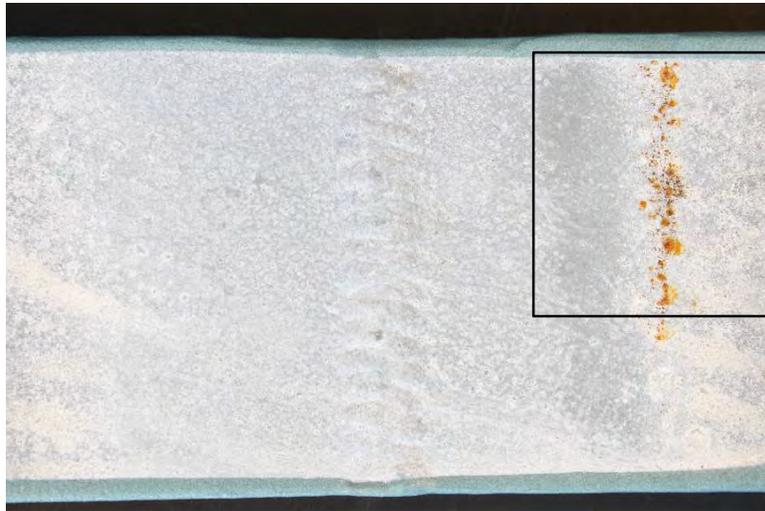
Proben teilen



Quelle: IKS Dresden GmbH

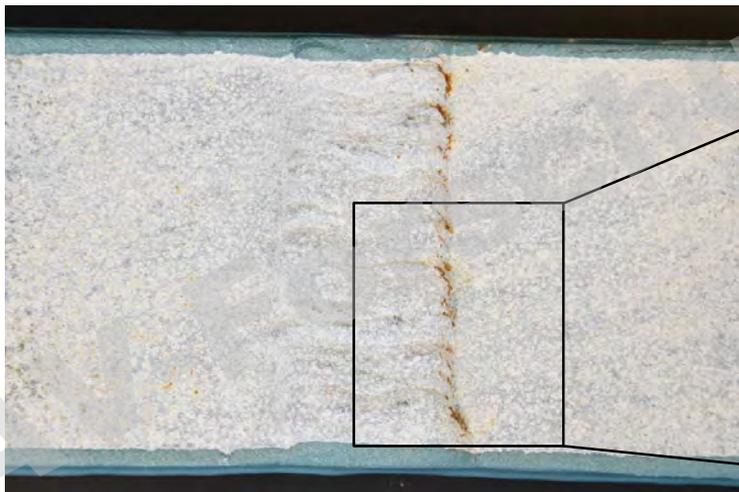
## Ergebnis der forcierten Bewitterung im Labor

## Montagestöße



**Ziel:**  
Identifikation von  
Schwachstellen

Überlappungszone von  
Spritz- und Feuerverzinkung

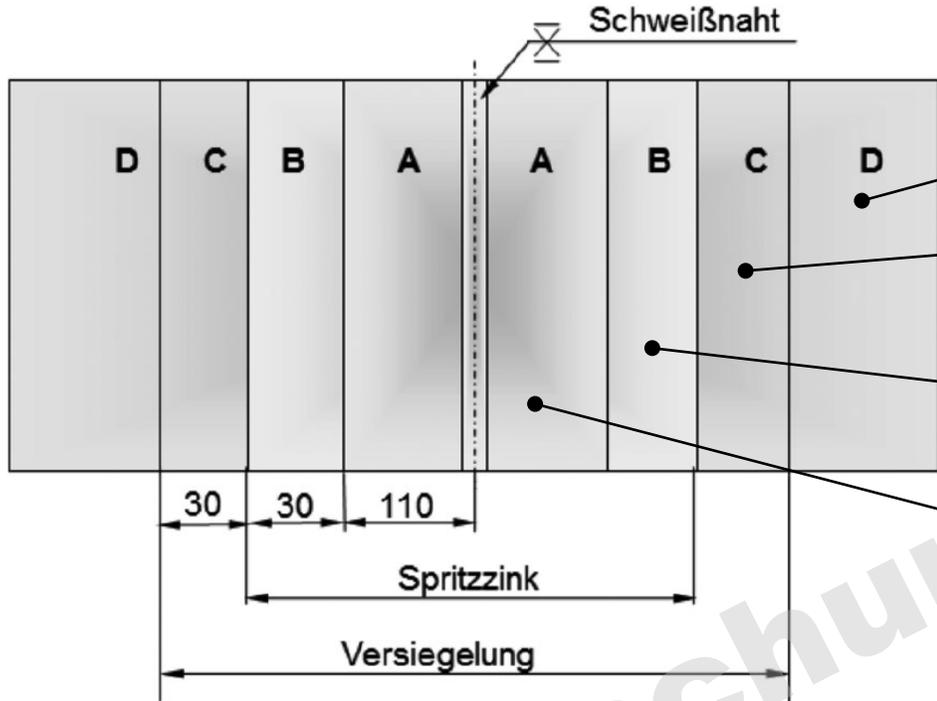


Fehler der Spritzverzinkung  
im Bereich der gewölbten  
Schweißnaht (Spritzschatten)

Quelle: IKS Dresden GmbH

## Ausführung von geschweißten Montagestößen

## Montagestöße



**Fläche D**, unbearbeitete und intakte Feuerverzinkung

**Fläche C**, gesweepte Feuerverzinkung mittlere Rautiefe bis  $R_{y5} = 40 \mu\text{m}$  (G), Beschichtung mit Porenfüller

**Fläche B**, gesweepte Feuerverzinkung mittlere Rautiefe bis  $R_{y5} = 40 \mu\text{m}$  (G), thermisch gespritzt  $> 200 \mu\text{m}$  und versiegelt

**Fläche A**, gestrahlter Stahl Oberflächenvorbereitungsgrad: Sa 3, Rauheitsgrad: grob (G), Rautiefe bis  $R_{y5} = 85 \mu\text{m}$  (G), thermisch gespritzt  $> 200 \mu\text{m}$  und versiegelt

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 Montagestößen

- 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

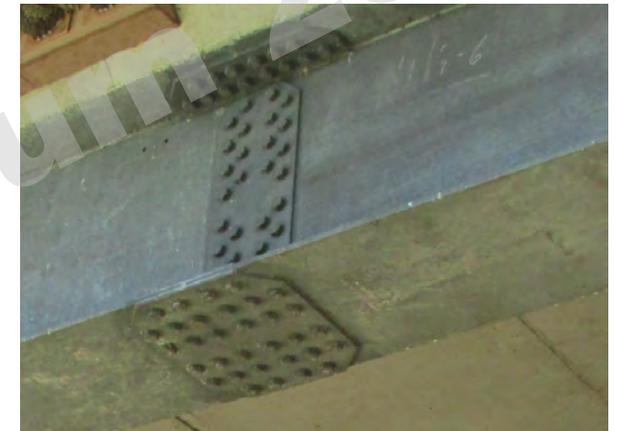
- Gleitwiderstand  $F_{s,Rd}$  (DIN EN 1993-1-8): 
$$F_{s,Rd} = \frac{\mu \cdot F_{p,C}}{\gamma_{M3}}$$

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

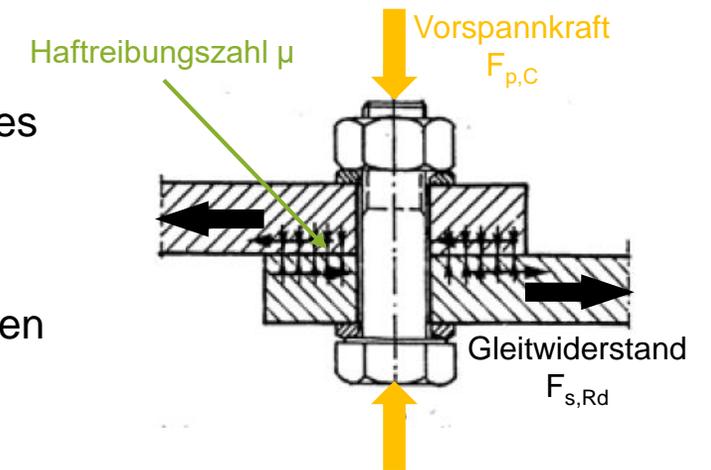
### Offene Fragen:

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

## Montagestöße



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



# Untersuchung geschraubter feuerverzinkter Verbindungen für den Brückenbau

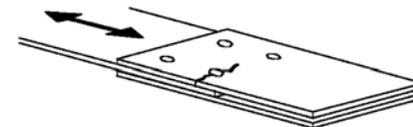
## Montagegestöße

### 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:  
 $\mu = 0,35 \rightarrow \mu = 0,25$

### Ermüdungsfestigkeit:

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



Quelle: DIN EN 1993-1-9



Quelle: TU Dortmund

## Untersuchung geschraubter feuerverzinkter Verbindungen für den Brückenbau

### Montagestöße

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



Brückenträger

Lasche



Quelle: TU Dortmund

Quelle: TU Dortmund

# Einsatz von feuerverzinkten Baustählen im Verkehrsbrückenbau unter Ermüdungsbeanspruchungen

1. Motivation und Forschungsanlass
2. Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
3. Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
4. Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
5. Ausführung von Montagestößen

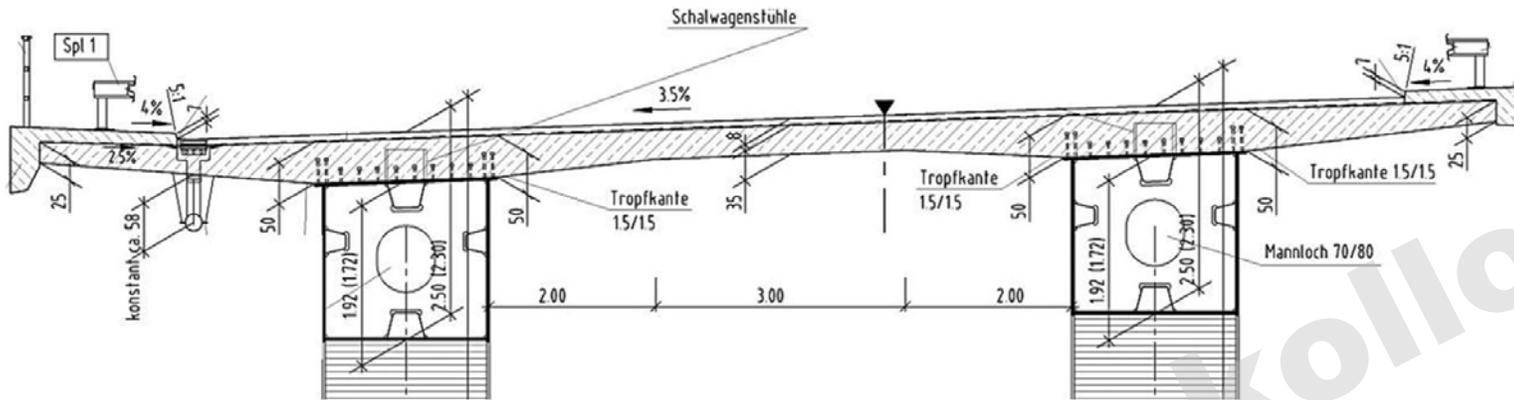
---

6. Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen

---

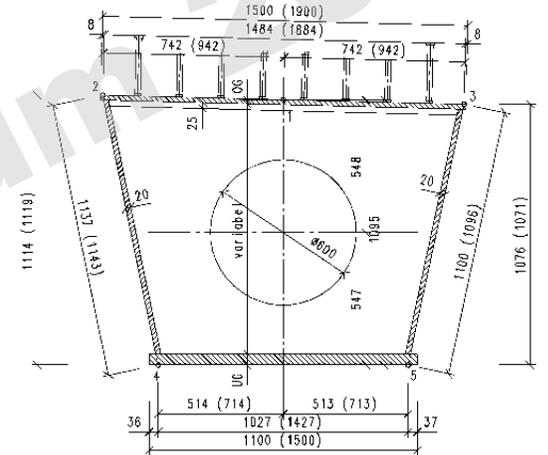
7. Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge
8. Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken

## Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen



Typischer Querschnitt von Stahlverbund-Deckbrücken: Böbertalbrücke A4  
Quelle: DEGES/Schüßler-Plan

## Kleine Hohlkästen



Querschnitt einer Verbundbrücke mit kleinem Hohlkasten  
Quelle: PSP Ingenieure Dortmund

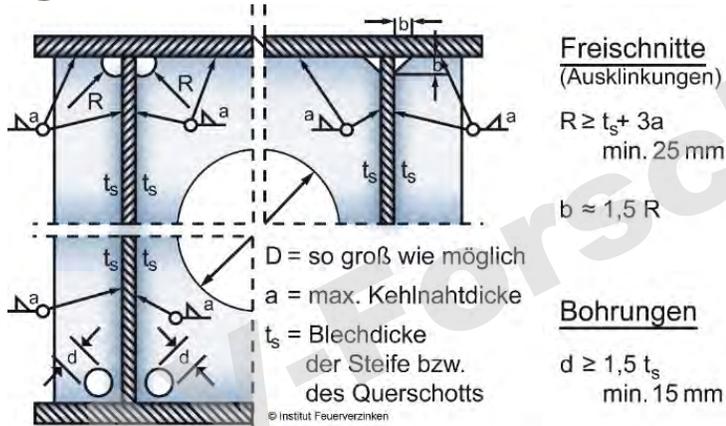
### Offene Fragestellungen:

- Kleine Hohlkästen werden dichtgeschweißt und von außen mit einer organischen Beschichtung vor Korrosion geschützt. Die innenliegenden Oberflächen erhalten keinen Korrosionsschutz.
- Ist bei einer feuerverzinkten Ausführung der Korrosionsschutz aller Oberflächen technisch machbar und damit die gesamte Konstruktion korrosionsgeschützt?
- Wie muss feuerverzinkungsgerecht konstruiert werden?
- Zulauf- und Entlüftungsöffnungen sind für die Feuerverzinkung notwendig
  - Größe und Position der Öffnungen?
  - Einfluss auf die statischen Anforderungen?
- Verformungen
- Ermüdungssicherheit

# Größe und Positionen der Öffnungen

- Die Eintauchgeschwindigkeit wurde mit 0,6 m/min besonders niedrig gewählt, um dadurch die Temperaturunterschiede im Bauteil zu maximieren und damit die ungünstigsten Bedingungen zu prüfen.
- Das Gewicht des 10 m langen verzinkten Trägers beträgt 4.200 kg

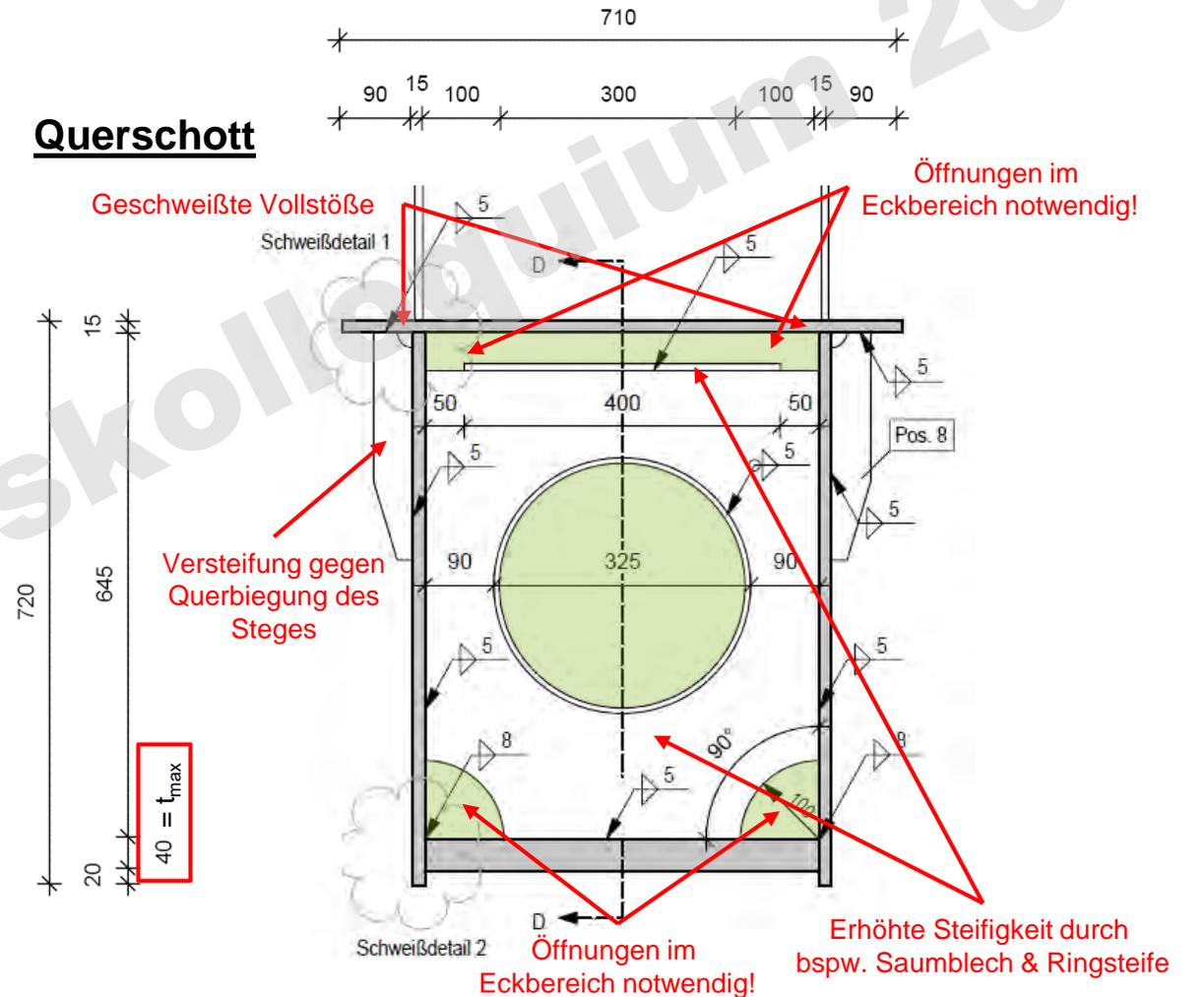
Regelwerke: DIN EN ISO 14713-2 & DASt-Richtlinie 022



Vorgaben zu Durchflussöffnungen für das Feuerverzinken  
Quelle: Institut Feuerverzinken

## Kleine Hohlkästen

### Querschott



Querschnitt eines kleinen Hohlkastens mit Querschott unter Berücksichtigung der feuerverzinkten Ausführung

# Untersuchung von Verformungen am Großteilversuch

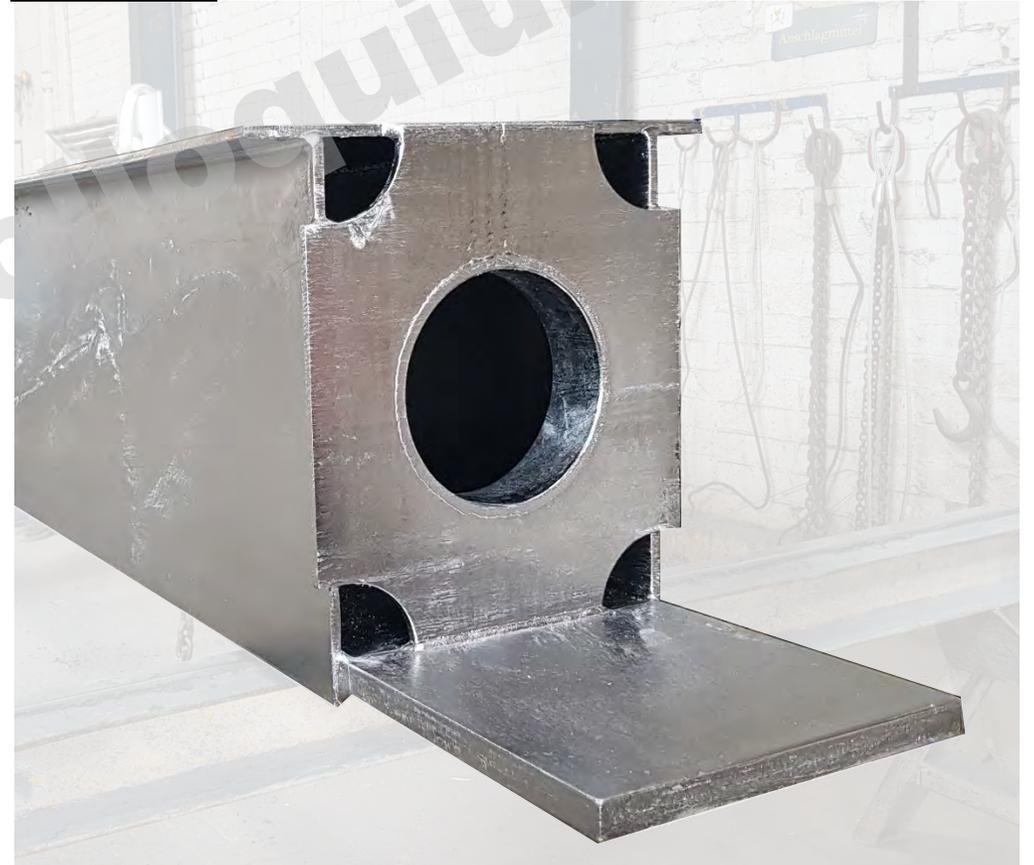
## Kleine Hohlkästen

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

- Keine plastischen Verformungen durch die Feuerverzinkung
- Der Stich bleibt quasi unverändert ( $\pm 1$  mm)

- Die Maßhaltigkeit nach dem Feuerverzinken ist gegeben.**

### Endschott

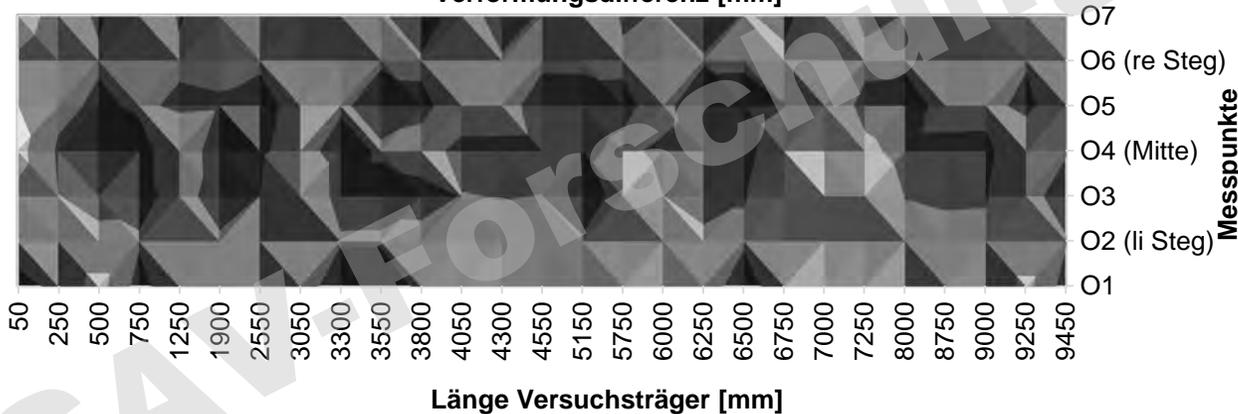


Großteilversuch zur Untersuchung von Verformungen und Rissfreiheit nach der Feuerverzinkung

### Verformung des Obergurtes nach dem Verzinken

■ -2-0 ■ 0-2 ■ 2-4

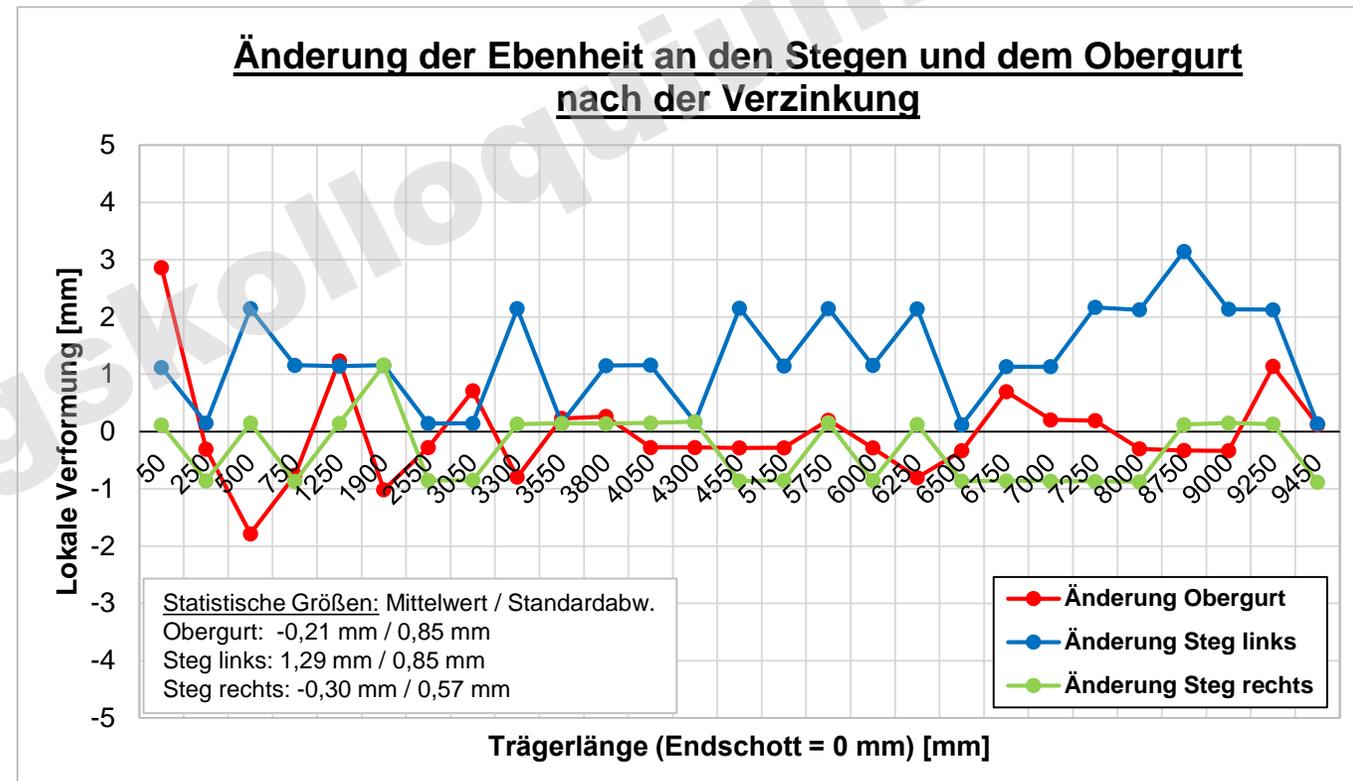
Verformungsdifferenz [mm]



## Ergebnisse des Großteilversuchs

- Der Vergleich der gemittelten lokalen Verformungen (inkl. Zinkschicht) zeigt eine leichte Änderung der Ebenheit am linken Steg
- Die Zinkschichtdicken liegen zwischen
  - 121 | **204** | 263  $\mu\text{m}$  am Obergurt (n = 81)
  - 119 | **140** | 170  $\mu\text{m}$  am Steg links (n = 54)
  - 117 | **140** | 173  $\mu\text{m}$  am Steg rechts (n = 54)
- Die Tauchdauer zielte darauf ab eine vollständige Erhitzung des Bauteils sicherzustellen. Eine Vorgabe hinsichtlich der zu erzielenden Zinkschichtdicke gab es nicht.
- Es treten keine plastischen Verformungen durch die Feuerverzinkung

## Kleine Hohlkästen



# Kerbfälle der feuerverzinkten Kerbdetails

## Kleine Hohlkästen

- Feuerverzinkte Kerbfälle geschweißter und geschraubter Kerbdetails von Hohlkästen müssen nicht abgemindert werden

Arbeitspaket und Beschreibung	AP 2.1 einschnittige Passschraubenverbindung	AP 2.2 seitlich angeschweißtes Knotenblech	AP 2.3 aufgeschweißte Quersteife	AP 2.4 Kreuzstoß
Kerbdetail	<p>Diagram showing a single cut connection with bolts. Photo shows a vertical beam with bolts. Label: R=4,5 VBR/AS</p>	<p>Diagram showing a side-welded node plate with radius r and length l. Photo shows a cross-section of a node plate. Label: AP 2.2. In 1/1 Winkel</p> <p><math>r = 30 / l = 90 \text{ mm}</math></p>	<p>Diagram showing a welded cross stiffener. Photo shows a cross-section of a beam with a stiffener. Label: 6, 8</p>	<p>Diagram showing a cross joint with length l and thickness t. Photo shows a cross joint. Label: 1</p> <p><math>l \leq 50 \text{ mm}</math></p>
Kerbfall unverzinkt EN 1993-1-9:2010 & prEN 1993-1-9:2023	80 (Tab. 8.1, Detail 12) 80 (Tab. 10.2, Detail 4)	71 (Tab. 8.1, Detail 4) 56 (Tab. 10.5, Detail 4/5)	80 (Tab. 8.4, Detail 6/8) 80 (Tab. 10.5, Detail 7/8)	80 (Tab. 8.4, Detail 1) 71 (Tab. 10.6, Detail 1)
Kerbfall feuerverzinkt GAV-IGF 20824 N	<b>93,4</b> > 80 ✓	<b>75</b> > 71 & 56 ✓	<b>88</b> (S355) > 80 ✓ <b>100</b> (S460 [P835]) > 80 ✓	<b>95,7</b> > 80 & 71 ✓

# Einsatz von feuerverzinkten Baustählen im Verkehrsbrückenbau unter Ermüdungsbeanspruchungen

1. Motivation und Forschungsanlass
2. Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
3. Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
4. Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
5. Ausführung von Montagestößen
6. Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen

---

7. Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge

---

8. Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken

## Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge

- Fahrbahnübergangskonstruktionen gleichen Bewegungen und Verformungen der Brücke aus. Hauptsächlich dienen Sie der Kompensation der Längsdehnung des Brückentragwerks.
- Je nach zu erwartenden Längenänderungen & Verformungen werden unterschiedliche Konstruktionen verwendet.
- Modulare Dehnfugen-Konstruktionen mit Lamellen und Traversen eignen sich besonders für große aufzunehmende Dehnwege von aktuell bis zu 3 m.
- Als hochdynamisch beanspruchte Konstruktionen sind sie besonders ermüdungsgefährdet.
- Aufgrund ihrer Lage sind sie extremen Korrosionsbedingungen ausgesetzt. Die Einflüsse aus Temperatur, Feuchtigkeit und Tauwassereintrag sind noch nicht hinreichend untersucht worden.

## Fahrbahnübergänge

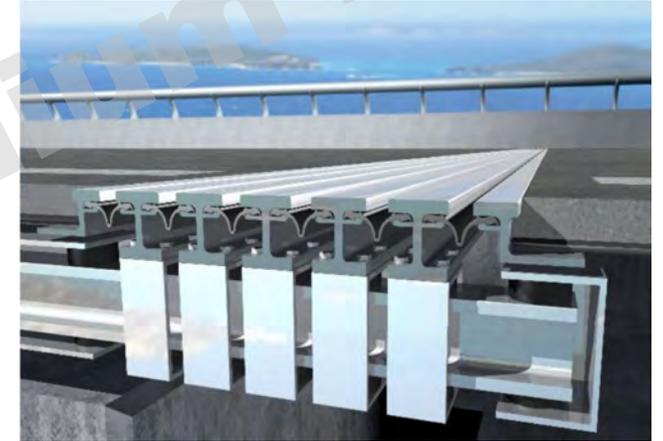


2002 eingebauter feuerverzinkter Fahrbahnübergang Talbrücke Reichenbach A71

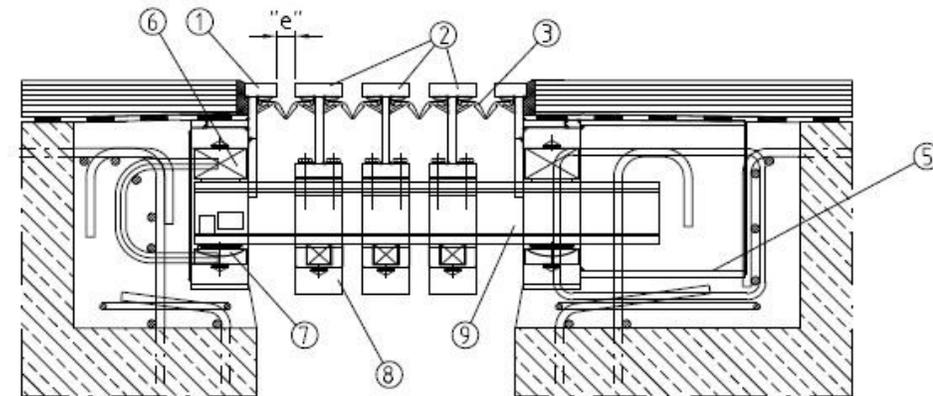
## Korrosionsschutzanforderungen

- 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.

## Fahrbahnübergänge



Quelle: mageba



Quelle: ETAG 032 –Teil 8

# Voruntersuchungen zum Korrosionsschutz von Fahrbahnübergängen

50 Jahre Korrosionsschutzdauer können für C5 mit einer Feuerverzinkung sicher realisiert werden:

- 250 µm für Sebestystahl
- 315 µm für Hochsiliziumstahl

Die Si-Gehalte der von den Herstellern verwendeten Baustähle zeigen, dass die angestrebten Schichtdicken in einem erzielbaren Bereich liegen.



Reichenbachtalbrücke A 71  
im Thüringer Wald  
Sollinger Hütte  
**Baujahr 2002**

Urspr. Duplex-System

Zink: 300 – 400 µm

Beschichtung: 100 – 150 µm

Zinkschicht heute

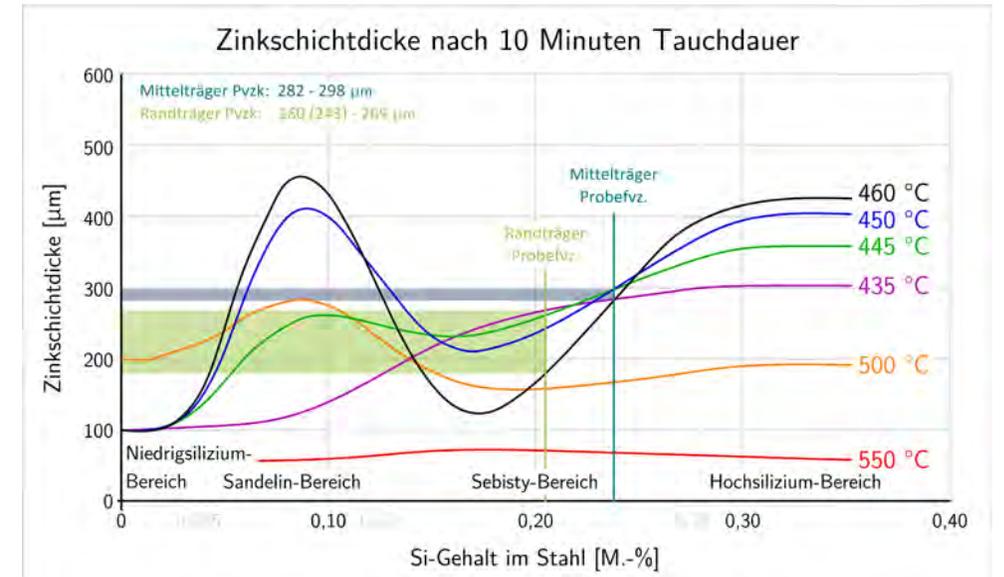
< 60 µm im Überfahrtsbereich

Sonst **200 – 300 µm**

Schichtdickenmessung an der Reichenbachtalbrücke  
Quelle: IKS Dresden GmbH

## Fahrbahnübergänge

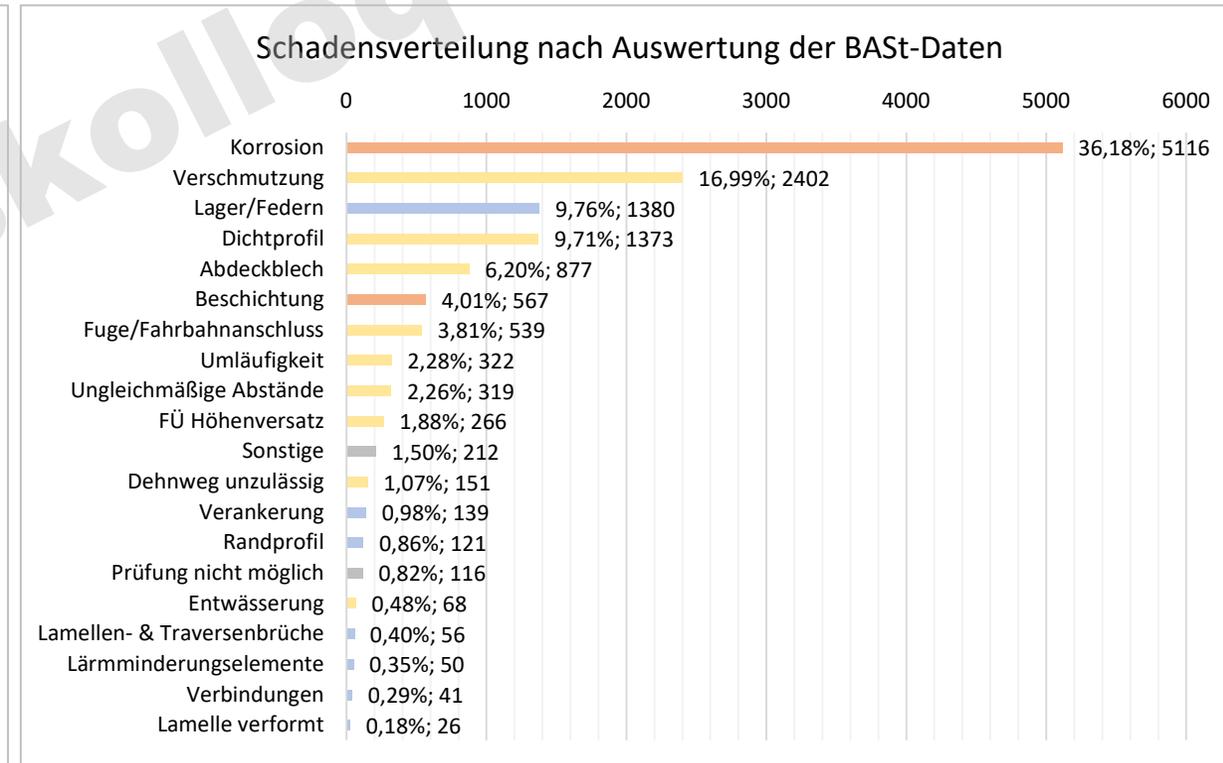
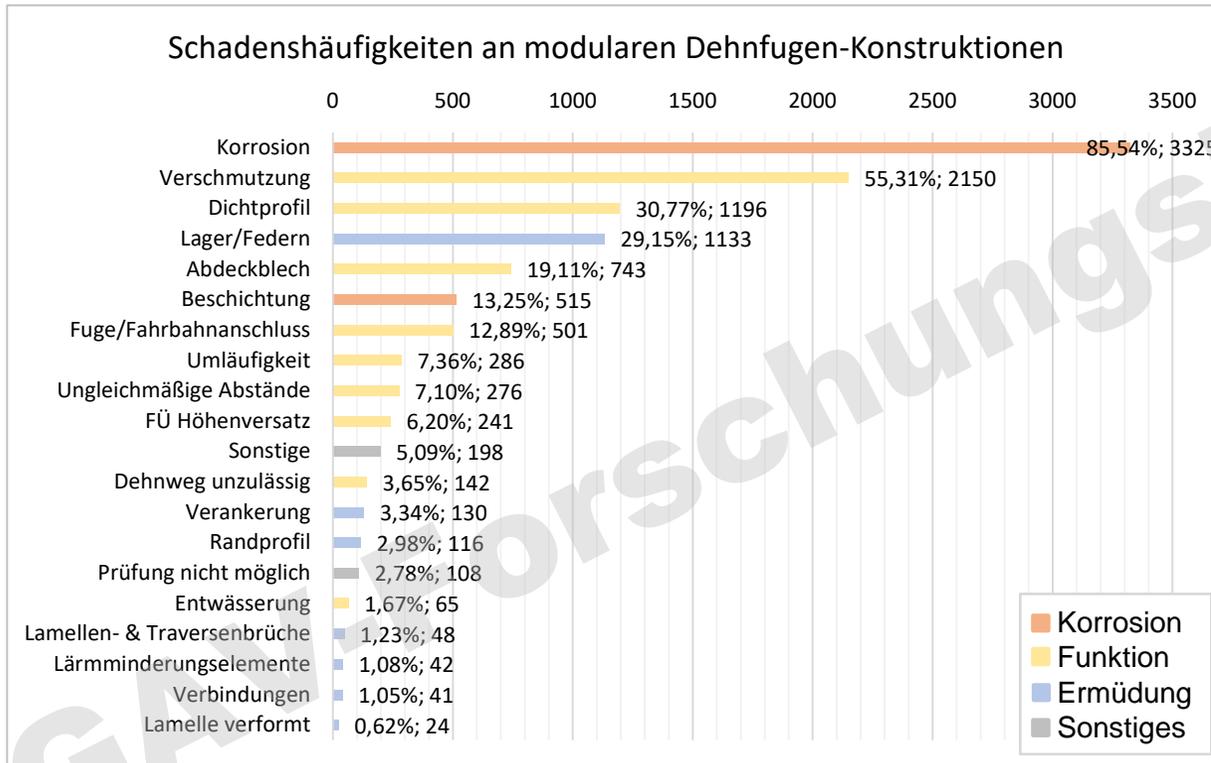
erf. µm für 50 Jahre mit $r_{corr}$ nach DIN EN ISO 9223 Tabelle 2							
Kategorie	C4		C5		CX		
$r_{corr}$ [µm/a]	2,10	3,15	4,20	6,30	8,40	16,77	25,00
<b>Sebestystahl (<math>b_{95\%} = 0,933</math>)</b>							
<b>D</b>	80,79	121,19	161,58	<b>242,37</b>	323,16	645,17	961,79
<b>D (t &gt; 20)</b>	82,45	123,68	164,90	<b>247,36</b>	329,81	658,44	981,57
<b>Hochsiliziumstahl (<math>b_{in} = 1,0</math>)</b>							
<b>D</b>	105,00	157,50	210,00	<b>315,00</b>	420,00	838,50	1250,00



# Schadenskatalog nach Auswertung von rund 14.000 Einzelschäden

## Fahrbahnübergänge

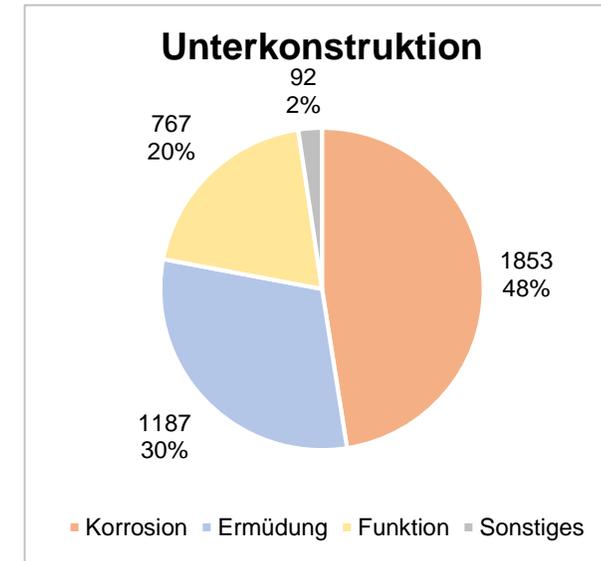
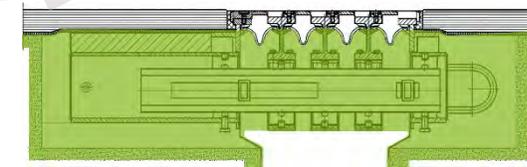
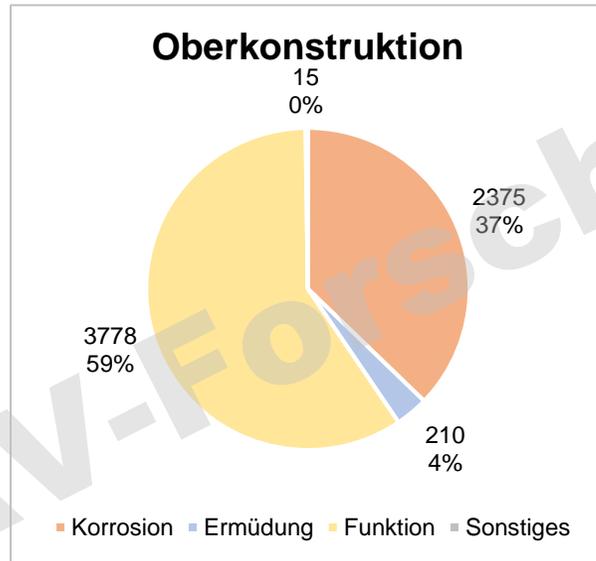
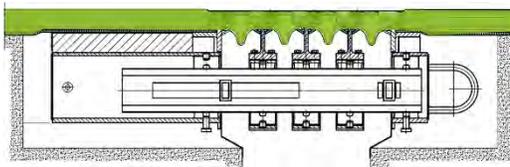
- 86 % der untersuchten Fahrbahnübergänge weisen Korrosionsschäden auf
- 36 % aller Schäden sind Korrosionsschäden



## Nicht ausreichender Korrosionsschutz

## Fahrbahnübergänge

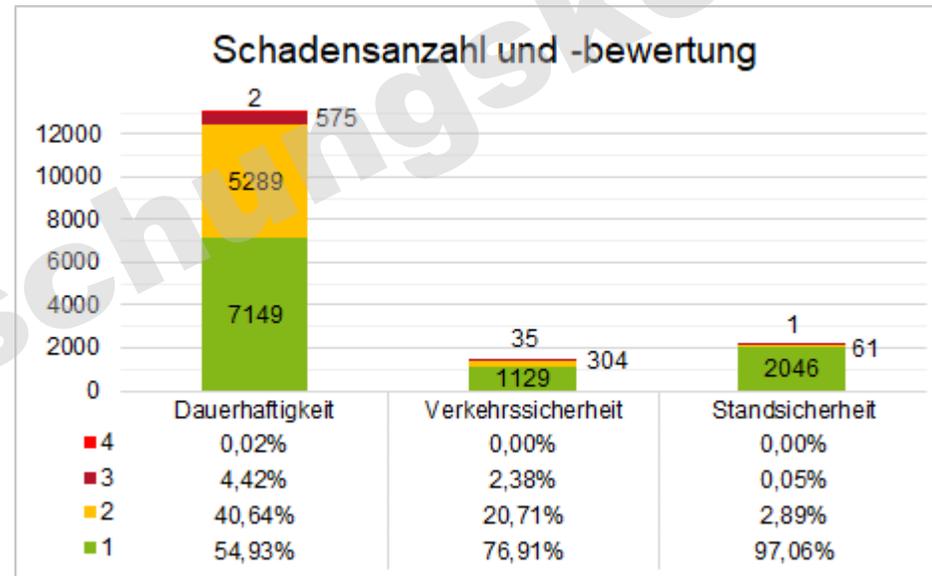
- Korrosionsschäden treten auch fernab der befahrbaren Oberfläche auf  
 → Die Unterkonstruktion (unterhalb der Dichtebene) ist ebenso von Korrosion betroffen wie die Oberkonstruktion
- Ermüdungsschäden (Lager/Federn) treten hauptsächlich an der Unterkonstruktion auf



## Bewertung der einzelnen Sicherheitsaspekte S/V/D

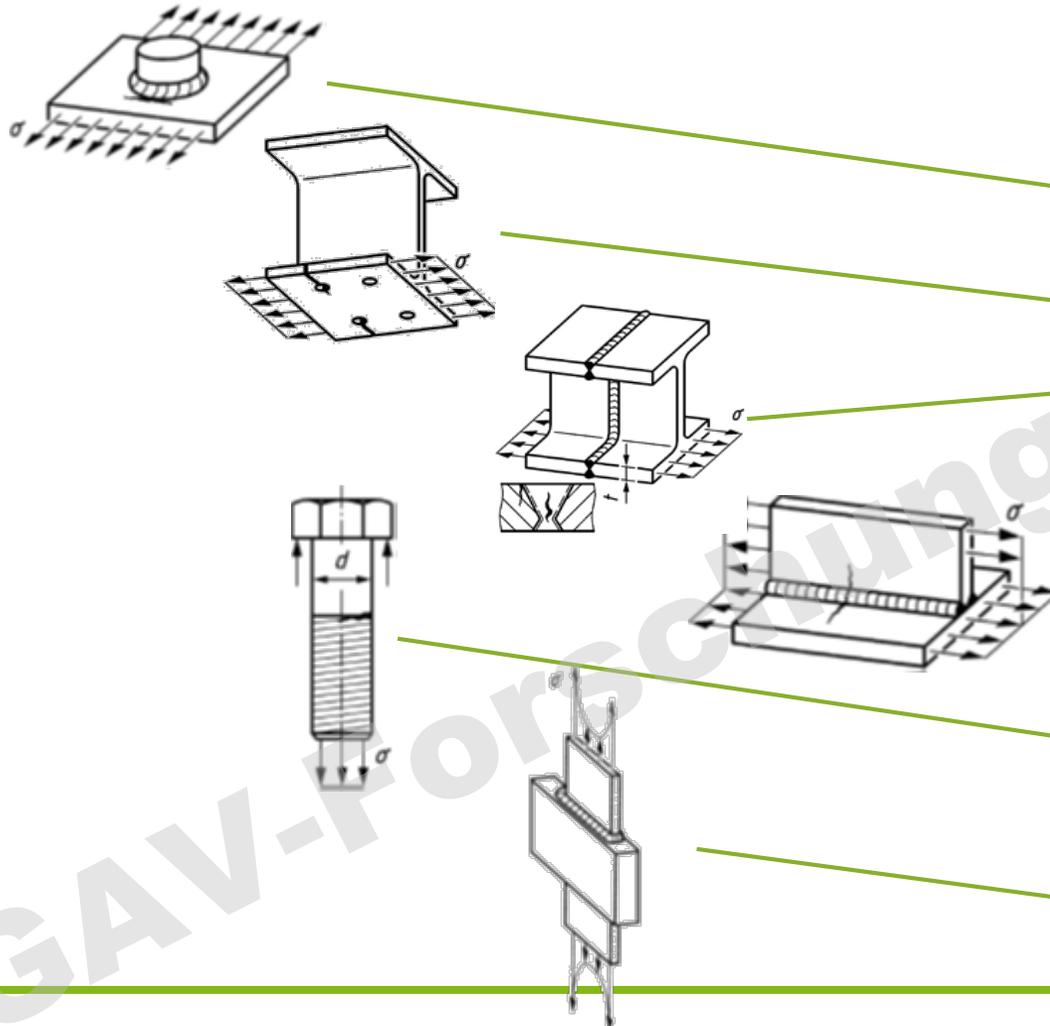
## Fahrbahnübergänge

- Der am häufigsten beeinträchtigte Sicherheitsaspekt ist die Dauerhaftigkeit
- Es gibt nur einige wenige Schäden, die kurzfristige Maßnahmen erforderlich machen (Bewertung  $\geq 3$ )
  - D: Undichte Dehnprofile
  - V: Fehlende Abdeckbleche, lose Lärminderungs-elemente
  - S: Lamellen- und Traversenbrüche



# Ermüdung unter Betrachtung der aktuellen und neuen Fassung des EC3-1-9

## Fahrbahnübergänge



Übersicht der Ermüdungsnachweise $\eta (\Delta\sigma_R) = \Delta\sigma_{Ed} / \Delta\sigma_R$		Norm	DIN EN 1993-1-9:2010-12		prEN 1993-1-9:2023	
			$\Delta\sigma_R$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L   \Delta\tau_L$	$\Delta\sigma_D$
<b>1 Ermüdung der Lamelle</b>						
1.1 Auflager, ohne LME	Normal	unv	0,98	1,79	0,73	1,12
		fvz	1,13	2,05	0,83	1,28
1.2 Auflager, mit Sinusplatten	Normal	Eurocode	2,90	5,27	1,16	1,70
		Hersteller	Kerbfall aus Versuch		1,04	1,60
1.3 Auflager, mit Rauten	Normal	unv/fvz	1,53	2,78	1,53	2,78
1.4 Feld, ohne Steuerung	Normal	unv	0,91	1,65	0,67	1,03
		fvz	1,04	1,89	0,76	1,18
1.5 Feld, mit Steuerung	Normal	unv/fvz	2,66	4,85	1,96	3,05
1.6 Feld, Lamellenstoß	Normal	unv	0,56	1,02	0,50	0,91
		fvz	0,56	1,02	0,56	1,02
1.7 Feld, Hybridträger	Normal	unv	0,39	0,72	0,39	0,72
		Schub	unv		1,40	
1.8 Feld, Klaue	Normal	unv/fvz	0,49	0,89	0,49	0,89
		Schub	unv/fvz		1,40	
<b>2 Ermüdung der Traverse</b>						
2.1 Feld, ohne Löcher	Normal	unv	0,77	1,40	0,57	0,87
		fvz	0,88	1,60	0,65	1,00
2.2 Feld, mit Löchern	Normal	nicht rel.	0,38	0,58	0,49	0,58
<b>3 Ermüdung der Verbindungen</b>						
3.1 Sinusplatten	Normal	unv/fvz	0,24	0,44	0,24	0,44
3.2 Rauten	Normal	unv/fvz	1,17	2,13	1,17	2,13
		Schub	unv/fvz		0,17	
3.3 L/T geschraubt	Normal	unv/fvz	0,19	0,35	0,19	0,35
3.4 L/T geschweißt	Normal	unv/fvz	0,18	0,33	0,20	0,37
		Schub	unv/fvz		0,15	

# Einsatz von feuerverzinkten Baustählen im Verkehrsbrückenbau unter Ermüdungsbeanspruchungen

1. Motivation und Forschungsanlass
2. Korrosionsschutz durch Feuerverzinken im Brückenbau
3. Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Details
4. Verbunddübelleisten zur Schubübertragung
5. Ausführung von Montagestößen
6. Feuerverzinken von Brücken mit kleinen Hohlkästen
7. Feuerverzinkte Fahrbahnübergänge

---

## 8. Neue ausgeführte feuerverzinkte Brücken

---

## Ausgewählte ausgeführte feuerverzinkte Brücken

**Erfahrungsbericht:**  
Berichte der Bundesanstalt für  
Straßenwesen – Heft B 170

BAB 44 bei Kassel



Quelle: Korrosionsschutz – Feuerverzinken, Beuth Verlag

Ruhrbrücke Grüental bei Monschau



Quelle: Claus Queck GmbH

Im Bereich der  
Bundesautobahn durch  
Erteilung einer  
Zustimmung im Einzelfall



Elsterbrücke Osendorf

Quelle: SSF Ingenieure

**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

## Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

- Die Feuerverzinkung hat sich als **wirtschaftlich sinnvoller Korrosionsschutz** im Brückenbau erwiesen
- **Korrosionsschutzdauern von über 100 Jahren** können mit der Feuerverzinkung sicher erzielt werden
- Die Bewertung **des Einflusses auf die Ermüdungsfestigkeit** wird in kommende Normungen einfließen
- Für den erfolgreichen Einsatz der Feuerverzinkung sind **konstruktive Besonderheiten** zu beachten:
  - DAST-Richtlinie 022 – „Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen“
  - DIN EN ISO 14713-2:2020-05 – Zinküberzüge - Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion - Teil 2: Feuerverzinken
- Die **Erweiterung des Einsatzgebietes** auf weitere Bauteile wie geschweißte Holkästen oder Fahrbahnübergänge ist möglich oder wird gerade geprüft

## Danksagung

Die IGF-Forschungsprojekte FOSTA P835 (IGF-Nr.351/ZBG), FOSTA P1042 (IGF-Nr.18624N), FOSTA P1574 (IGF-Nr.22524BG) der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) sowie die beiden GAV-Projekte (IGF-Nr.19444BG & IGF-Nr.20824N) 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 mitfinanzieller 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. Darüberhinaus geht ein herzlicher Dank an die Projektpartner, die beteiligten Industrieunternehmen und die Projektbegleitenden Ausschüsse aller Projekte für ihre Unterstützung.

GAV-Forschungskolloquium 2023

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

# Einsatz von feuerverzinkten Brücken unter Ermüdungsbeanspruchungen



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, M.Sc.



Technische Universität Darmstadt  
MPA / IfW Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner  
Dr.-Ing. Marcus Klein  
Dr.-Ing. Anna-Katharina Kraemer



Institut für Korrosionsschutz  
Dresden GmbH

Dr.-Ing. Susanne Friedrich  
Dipl.-Ing. (FH) Peter Lebelt