



**Entwurfshilfe zum Einsatz von feuerverzinkten Bauteilen im Stahl- und Verbundbrückenbau**

## Impressum

Entwurfshilfe zum Einsatz von feuerverzinkten  
Bauteilen im Stahl- und Verbundbrückenbau  
Nr. B 505

Herausgeber:

bauforumstahl e.V. | Sohnstraße 65 | 40237 Düsseldorf  
Postfach 104842 | 40039 Düsseldorf  
T: +49 (0)211.6707.828 | F: +49 (0)211.6707.829  
zentrale@bauforumstahl.de | www.bauforumstahl.de  
www.facebook.com/bauforumstahl

Copyright © Januar 2016 bauforumstahl e.V.

Ein Nachdruck dieser Publikation – auch auszugsweise – ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers bei deutlicher Quellenangabe gestattet.

Bei der Zusammenstellung aller Texte, Formeln, Abbildungen, Zeichnungen und Tabellen wurde mit größtmöglicher Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden.

bauforumstahl kann für fehlerhafte Angaben und deren Folgen keine Haftung übernehmen. Rechtsansprüche aus der Benutzung der bereitgestellten Daten sind daher ausgeschlossen. Für Hinweise und Verbesserungsvorschläge sind wir stets dankbar.

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. D. Ungermann, Dipl.-Ing. D. Rademacher, Dr.-Ing. Th. Pinger und Dr.-Ing. O. Hechler.

## Danksagung

Diese Broschüre enthält Forschungsergebnisse des IGF-Vorhabens 351/ZBG der Forschungsvereinigung Stahl-anwendung e.V. (FOSTA) mit Kooperation des Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (GAV) und des Deutschen Ausschuss für Stahlbau (DASt), das über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde. Die Bearbeitung erfolgte durch die drei Forschungsstellen: Lehrstuhl Stahlbau der Technischen Universität Dortmund, Materialprüfungsanstalt (MPA) der Technischen Universität Darmstadt und Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH (IKS). Das Forschungsprojekt wurde durch die AiF für herausragende Leistungen auf dem Gebiet der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) mit dem Otto von Guericke Preis 2014 ausgezeichnet. Den vorgenannten Forschungsstellen und Einrichtungen sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

bauen im **wertstoffkreislauf 3R**  
reduce reuse recycle bauen im  
**wertstoffkreislauf 3R** reduce re



## Inhaltsverzeichnis

0	<b>Vorwort</b>	Seite 6
<hr/>		
1	<b>Motivation</b>	Seite 7
<hr/>		
2	<b>Konzeptionierung</b>	Seite 7
2.1	Konzeptionierungsgrundlagen	Seite 7
2.2	Allgemeine Anforderungen an den Korrosionsschutz von Brückenbauwerken	Seite 8
2.3	Verbundbrücken mit verzinkten Längsträgern	Seite 9
2.3.1	Allgemeines	Seite 9
2.3.2	Fertigung, Transport und Montage	Seite 10
<hr/>		
3	<b>Dauerhaftigkeit stückverzinkter Komponenten</b>	Seite 10
3.1	Grundlagen der Stückverzinkung	Seite 10
3.2	Charakteristik der Zinkschicht	Seite 11
3.3	Auslegung des Korrosionsschutzes	Seite 12
3.4	Ausbesserung von Zinkschichten	Seite 13
3.4.1	Allgemeines	Seite 13
3.4.2	Oberflächenvorbereitung	Seite 14
3.4.3	Spritzmetallisierung	Seite 14
3.4.4	Porenschließende Versiegelung	Seite 14
3.5	Duplex-Systeme	Seite 14
3.6	Kontakt mit Beton	Seite 15
<hr/>		
4	<b>Grundlagen zur verzinkungsspezifischen Bemessung und Konstruktion</b>	Seite 15
4.1	Allgemeines	Seite 15
4.2	Normative Regelungen	Seite 16
4.3	Bemessungsrelevante Besonderheiten bei der Verzinkung	Seite 16
4.4	Konstruktionsrelevante Besonderheiten bei der Verzinkung	Seite 16
4.4.1	Grundlegende Aspekte	Seite 16
4.4.2	Grundlagen des feuerverzinkungsgerechten Konstruierens	Seite 17
4.4.3	Vermeidung von eigenspannungsbedingtem Verzug	Seite 18
4.4.4	Vermeidung von Verzug infolge unterschiedlichen Abkühlungsverhaltens	Seite 18
4.5	Materialwahl	Seite 19
4.6	Transport	Seite 19
<hr/>		

<b>5</b>	<b>Allgemeines zu Entwurf, Bemessung und Konstruktion</b>	Seite 20
5.1	Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	Seite 20
5.2	Bemessung von Schraubverbindungen (GV-Verbindungen) für feuerverzinkte Bauteile	Seite 20
5.3	Nachweise der Ermüdungsfestigkeit	Seite 22
<hr/>		
<b>6</b>	<b>Detailausbildung für verzinkte Stahl- und Verbundbrücken</b>	Seite 24
6.1	Allgemeines	Seite 24
6.2	Allgemeine Hinweise zur beanspruchungsrelevanten Detailausbildung für die Verzinkung	Seite 24
6.3	Standarddetails von Verbundbrücken mit kleinen und mittleren Spannweiten	Seite 25
6.3.1	Stahlquerträger über Endauflagern und Mittelstützen	Seite 25
6.3.1.1	Geschweißter Anschluss eines I-Querträgers am Auflager	Seite 25
6.3.1.2	Geschraubter Anschluss eines I-Querträgers am Auflager	Seite 26
6.3.2	Betonquerträger über dem Endauflager	Seite 28
6.3.3	Betonquerträger über Mittelstützen	Seite 30
6.3.4	Stahlquerträger im Feld	Seite 32
6.3.4.1	Allgemeines	Seite 32
6.3.4.2	Geschraubter Anschluss eines I-Querträgers mit T-Rippe im Feld	Seite 33
6.3.4.3	Geschraubter Anschluss eines I- oder U-Querträgers mit Aussteifungsblech im Feld	Seite 33
6.3.4.4	Geschweißter Anschluss eines I- oder U-Querträgers an Aussteifungsblech im Feld	Seite 34
6.3.4.5	Direkter Schraubanschluss eines I-Querträgers an den Hauptträgersteg	Seite 35
6.3.4.6	Geschweißter Anschluss eines I-Querträgers direkt an den Hauptträgersteg	Seite 36
<hr/>		
<b>7</b>	<b>Ausführung verzinkungsspezifischer Montagestoßdetails</b>	Seite 36
7.1	Allgemeine Vorüberlegungen	Seite 36
7.2	Detail geschweißter Stumpfstoß	Seite 36
7.2.1	Montageablauf und Detailausbildung	Seite 36
7.2.2	Applikation des Korrosionsschutzes am Schweißstoß	Seite 38
7.2.3	Arbeitsproben	Seite 39
7.3	Detail geschraubter Laschenstoß	Seite 39
<hr/>		
<b>8</b>	<b>Prüfung, Überwachung, Qualitätssicherung</b>	Seite 40
8.1	Prüfung der Stahlkonstruktion	Seite 40
8.2	Prüfung der Zinkschichtdicke	Seite 40
8.3	Qualitätssicherung der Spritzmetallisierung	Seite 41
<hr/>		

<b>9</b>	<b>Wirtschaftliche Betrachtung</b>	Seite 42
9.1	Allgemeines	Seite 42
9.2	Auswirkungen der Kerbfall-Abminderung	Seite 42
9.3	Kostenquellen	Seite 43
9.4	Kosten für den Korrosionsschutz über die Nutzungsdauer von 100 Jahren	Seite 44
<hr/>		
<b>10</b>	<b>Nachhaltigkeitsbetrachtung</b>	Seite 46
10.1	Allgemeines zur Verzinkung	Seite 46
10.2	Nachhaltigkeitsbetrachtung	Seite 46
10.2.1	Studie der TU Berlin	Seite 46
10.2.2	Studie BAST	Seite 47
10.3	Umwelt-Produktdeklaration (EPD)	Seite 48
<hr/>		
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b>	Seite 50
<hr/>		
<b>12</b>	<b>Literaturverweise und Dokumente</b>	Seite 51
<hr/>		

## 0 | Vorwort

Stahl- und Stahlverbundbrücken sind wichtige Bestandteile der Verkehrsinfrastruktur. Die Vorteile des Werkstoffs Stahl kommen im Brückenbau vor allem dann zur Geltung, wenn besondere Herausforderungen zu meistern sind, wie große Spannweiten, geringe Bauhöhen oder kurze Bauzeiten. Neuere Forschungsergebnisse zeigen, dass sich mit dem Baustoff Stahl auch bei kleinen und mittleren Spannweiten nachhaltige und – über den Lebenszyklus betrachtet – kostengünstige Verbundbrücken realisieren lassen. Allerdings müssen Stahlbauteile vor Korrosion geschützt werden, um eine ausreichende Nutzungsdauer zu gewährleisten. Hierfür haben sich vor allem organische Beschichtungen und die Feuerverzinkung als geeignete Maßnahmen bewährt.

Bei Brücken- und Ingenieurbauten im Zuge von Bundesfernstraßen beschränkte sich der Einsatz von feuerverzinkten Bauteilen bislang auf Verkehrszeichenbrücken und Komponenten der Brückenausstattung, wie z.B. Geländer. Basierend auf dem neusten Stand der Wissenschaft und Technik ist jetzt auch die Anwendung von feuerverzinkten Stahlträgern unter nicht vorwiegend ruhender Belastung in greifbare Nähe gerückt. Auf der wissenschaftlichen Ebene wurden anhand umfangreicher Untersuchungen zum Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit die Grundlagen für den Nachweis der Ermüdungssicherheit erarbeitet. Auf der technischen Ebene haben zahlreiche Großverzinkereien ihre Anlagenkapazität erweitert und verfügen nun über Tauchbäder und Hebezeuge, die für eine Verzinkung von Stahlbauteilen mit brückenrelevanten Dimensionen geeignet sind.

Die erste Verbundbrücke mit feuerverzinkter Stahlkonstruktion im Bereich der Bundesfernstraßen entsteht im Rahmen des Neubaus der BAB A 44 von Kassel nach Herleshausen. Die Fertigstellung ist für den Sommer 2016 geplant. Es handelt sich um ein integrales Einfeld-Bauwerk mit einer Stützweite von 40 m zur Überführung eines Wirtschaftsweges. Parallel zur Planung dieses Pilotprojekts erfolgte die Erarbeitung des vorliegenden Dokuments.

In dieser Entwurfshilfe sind wesentliche Grundlagen zum Stückverzinken unter Berücksichtigung der neuesten Forschungsergebnisse praxisgerecht aufbereitet und es werden hilfreiche Anwendungsregeln und Empfehlungen für die Planung und den Entwurf von feuerverzinkten Bauteilen im Stahl- und Verbundbrückenbau zur Verfügung gestellt.

Dipl.-Ing. Heinz Friedrich, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Januar 2016

## 1 | Motivation

Brücken sind ein Teil der Infrastruktur und tragen zur Sicherung des Personen- und Warenverkehrs bei. Durch die schrittweise Erweiterung der Europäischen Union wurden auch die Anforderungen an die europäische Infrastruktur, und somit auch an die Brücken, gesteigert. Anpassungen sind erforderlich, nicht nur in den neuen Mitgliedsländern sondern auch in Deutschland mit neuen Hauptverkehrsadern mit erhöhtem Durchgangsverkehr. Diesbezüglich wird in den nächsten Jahren eine erneute Steigerung der Beförderungsleistung im Straßengüterverkehr in Deutschland um 20 % erwartet [1].

Neben dem Ausbau der Infrastruktur ist auch die Substanzsicherung zu gewährleisten. Durch die aus der Zunahme des Schwerverkehrs resultierende Nutzungsintensivierung der Bestandsbauwerke und der Alterung des Brückenbestands stellt diese eine Herausforderung dar. Die Relevanz, Bauwerke dauerhaft auszubilden und die Lebenszykluskosten für deren wirtschaftliche Bewertung heranzuziehen, wird damit klar aufgezeigt.

Stahl- und Verbundbrücken sind besonders dauerhafte und nachhaltige Bauwerke [2]. Durch die Verwendung feuerverzinkter Bauteile kann die korrosionsgerechte Gestaltung von Stahl- und Verbundbrücken noch weiter optimiert werden. Das Feuerverzinken bietet einen robusten Korrosionsschutz von Stahlbauteilen für eine Schutzdauer von vielen Jahrzehnten ohne aufwändige Wartungen und Instandhaltungsmaßnahmen. Hierdurch können direkte Kosten für die Sanierung selbst, als auch indirekte Kosten infolge verkehrstechnischer Behinderungen reduziert werden.

Aufgrund fehlender technischer Grundlagenkenntnisse und den daher fehlenden normativen Regelungen wurden feuerverzinkte Bauteile bisher jedoch – bis auf wenige Ausnahmefälle – nicht für Tragwerke unter zyklischen Belastungen ausgeführt. Diese Wissenslücke wurde in den letzten Jahren im Rahmen eines FOSTA-Forschungsprojekts [3] unter der Federführung des Lehrstuhls Stahlbau der TU Dortmund mit den Partnern MPA Darmstadt und Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH durch systematische Untersuchungen zum Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahl- und Verbundbrückenkonstruktionen kleiner und mittlerer Spannweiten für typische Details untersucht. Zusätzlich wurden die Möglichkeiten des Korrosionsschutzes durch Feuerverzinkung des Stahlbaus mit dem Ziel einer

verlängerten Schutzdauer analysiert sowie die Spritzmetallisierung als planmäßige Korrosionsschutzmaßnahme an konstruktiven Schweißstößen stückverzinkter Komponenten geprüft.

Die vorliegende Broschüre fasst die Ergebnisse der Forschungsarbeit zusammen und beantwortet für den Stahl- und Verbundbrückenbau folgende Fragen:

- Wie ist die Dauerhaftigkeit der Feuerverzinkung zu bewerten und wo ist Ihr optimaler Anwendungsbereich?
- Welche konstruktiven Vorgaben und Einschränkungen sind zu beachten?
- Welche Unterschiede ergeben sich in der statischen Bemessung und für den Nachweis der Ermüdungssicherheit für feuerverzinkte Bauteile im Vergleich zu beschichteten Bauteilen?
- Welche Forderungen entstehen für die Montage?
- Wie sind die Brücken zu warten und instandzusetzen?

Die Broschüre kommentiert beziehungsweise ergänzt somit die Normung an den Stellen, die für die Anwendung von feuerverzinkten Bauteilen im Stahl- und Verbundbrückenbau relevant sind. Damit wird eine Entwurfshilfe zur Verwendung feuerverzinkter Bauteile als tragende Komponenten im Stahl- und Verbundbrückenbau für Ingenieure zur Verfügung gestellt.

## 2 | Konzeptionierung

### 2.1 | Konzeptionierungsgrundlagen

Im Allgemeinen ist eine Brücke so zu entwerfen, bemessen und auszubilden, dass sie unter Berücksichtigung einer Nutzungsdauer von 100 Jahren die geforderten Gebrauchseigenschaften behält und somit den Einwirkungen sowie Einflüssen widersteht, die während der Ausführung und Nutzung auftreten können. Zusätzlich muss sie eine angemessene Dauerhaftigkeit im Verhältnis zu ihren Unterhaltskosten aufweisen. Diesen Anforderungen ist durch eine geeignete Baustoffwahl, die Bemessung, die bauliche Durchbildung sowie durch die Festlegung von Überwachungsverfahren für die Fertigung, die Ausführung und die Nutzung zu entsprechen.

Die vorliegende Entwurfshilfe für die Anwendung verzinkter Bauteile im Brückenbau greift diese Anforderungen auf Basis der europäischen Regelwerke/Eurocodes auf. Für die ausgearbeiteten Detaillösungen und Beispiele für Stahl- und Verbundbrücken mit kleinen und mittleren Spannweiten wurden folgende, zusätzliche Kriterien berücksichtigt:

- **Wirtschaftlichkeit:** Die Investitionskosten sind heute noch der entscheidende Faktor und dominieren die architektonische Wirkung des Bauwerks. Schlanke und effiziente Bauwerke können in vielen Fällen beide Kriterien vereinen. Leichte und schlanke Überbauten gewinnen durch geringere Aufwendungen für Material, weniger Transport- und Hebegewicht und führen oft zu kleineren Fundamenten; in den Gründungen liegt in der Regel ein hohes Einsparpotential. Zusätzlich sind die Kosten für Wartung und Instandhaltung zu berücksichtigen.
- **Ästhetik:** Auch wenn das äußerliche Auftreten von Brückenbauten im Allgemeinen nicht im Vordergrund steht, so sollte es doch nicht unberücksichtigt bleiben. Andernfalls kann ein vernachlässigtes Erscheinungsbild der Infrastruktur die Wahrnehmung des Umfeldes erheblich stören (dies war früher vor allem in den ländlichen Gegenden bei Brücken kleiner und mittlerer Spannweiten der Fall). Unter Berücksichtigung der eingeschränkten Budgets, sollte der Fokus auf den Elementen liegen, welche die Ästhetik des Bauwerks am meisten beeinflussen. Die einfache Betrachtung der gängigsten Brückenbauwerke im Bestand zeigt, dass die gewählte Oberfläche und die Geometrie der Ausbauten einen großen Einfluss auf die architektonische Wahrnehmung des Überbaus haben.
- **Schnelle Bauausführung:** In den üblichen Fällen von Baustellen in Wohngebieten oder bei Kreuzungen von Hauptverkehrsadern liegen die Kosten für Verkehrssperrungen oder –behinderungen im Bereich der Bauwerkskosten oder sogar darüber. Kurze Bauzeiten mit kurzen Verkehrsbehinderungen sparen Nutzerkosten während der Bauzeit ein, begrenzen somit auch die öffentlichen Ausgaben und fördern die öffentliche Akzeptanz der Baumaßnahme.
- **Einfache Bauweise:** Eine Vereinheitlichung der Bauwerke führt zu robusten, effizienten und vereinfachten Bauweisen, vereinfacht die Vorplanung, senkt die Baukosten und begrenzt die Instandhaltungsmaßnahmen. Des Weiteren öffnet die vereinfachte Bauweise einem größeren Kreis von Unternehmen den Zugang zum Markt und fördert damit die Entwicklung von konkurrenzfähigen Lösungen.
- **Ausführungsqualität:** Für die gängigen Bauwerksausführungen kann die Qualität trotz eines begrenzten Budgets durch eine sorgfältig geplante, kostenreduzierende Vorfertigung in der Werkstatt unter Berücksichtigung hoher Fabrikationsstandards gewährleistet werden.
- **Langlebigkeit und Wartungskosten:** Die heutigen Herausforderungen für Bauherren liegen in der Begrenzung der zunehmend steigenden Instandhaltungskosten für bestehende Bauwerke. Es ist daher wichtig, für die gängigen, zahlreichen Brückenbauwerke mit begrenztem technischen Aufwand dauerhafte und kosteneinsparende Lösungen zu entwickeln. Somit können in Zukunft die Wartungskosten erheblich reduziert werden. In diesem Zusammenhang werden bereits verschiedenartige Lösungen vorgeschlagen, wie z.B. Brücken mit integralen Widerlagern zur Begrenzung der erforderlichen Stützpfiler und Fahrbahnfugen oder der Einsatz wetterfester Stähle, welche ein regelmäßiges Beschichten der Brücke unnötig machen. In diesem Zusammenhang sei auf den notwendigen Korrosionsschutz der Brückenelemente hingewiesen. Die Betrachtung von Brücken mit verzinkten Bauteilen liefert eine alternative Möglichkeit, dauerhafte und kosteneinsparende Lösungen für die Zukunft zu planen und zu entwerfen.

## 2.2 | Allgemeine Anforderungen an den Korrosionsschutz von Brückenbauwerken

Brücken sind Bauwerke, die für einen sehr langen Nutzungszeitraum auszulegen sind. Soweit nichts Anderes gesondert festgelegt ist, wird die Nutzungsdauer einer permanenten Brücke mit 100 Jahren angesetzt [4]. Um die Dauerhaftigkeit der Tragstruktur sicherzustellen, sind entsprechende Maßnahmen vorzusehen, die entweder den Verschleiß berücksichtigen oder durch ausreichende Vorkehrungen vor den Einwirkungen schützen.

Bei der Ausführung von Stahl- oder Verbundbrücken erfolgt der Schutz der freiliegenden und damit der Bewitterung ausgesetzten, stählernen Tragelemente in der Regel durch Korrosionsschutzsysteme. Zu deren Auswahl sind bereits im Entwurfsstadium die während der Nutzungsdauer auftretenden Umweltbedingungen abzuschätzen und daraus spezifische Anforderungen an das Korrosionsschutzsystem, die konstruktive,

korrosionsschutzgerechte Gestaltung, die Ausführung im Werk als auch auf der Baustelle sowie die Überwachung und ggfs. Ausbesserung abzuleiten.

Hierbei sind die maßgeblichen Normen- und Regelwerke zu berücksichtigen, in Deutschland insbesondere die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 4: Stahlbau, Stahlverbundbau, Abschnitt 3: Korrosionsschutz von Stahlbauten [5], die Technischen Lieferbedingungen und Technischen Prüfvorschriften für Beschichtungsmittel für den Korrosionsschutz von Stahlbauten (TL/TP-KOR Stahlbauten) [6] sowie die EN ISO 12944 [7].

## 2.3 | Verbundbrücken mit verzinkten Längsträgern

### 2.3.1 | Allgemeines

Brückenüberbauten in Verbundbauweise bestehen aus Stahlprofilen als Längsträger mit darauf angeordneter Stahlbeton-Fahrbahnplatte [8]. Längsträger und Stahlbetonplatte sind in der Regel durch Kopfbolzendübel miteinander verbunden. Im Bereich der Auflager werden die Längsträger durch Querträger ausgestreift. Die Verbundbauweise empfiehlt sich für Überbauten mit freier oder geringfügig begrenzter Bauhöhe, bei Straßenbrücken bis zu etwa 35 m Stützweite als Einfeldträger und bis zu etwa 40 m Stützweite als Durchlaufträger.

Der Verbundquerschnitt erfordert bei schmaler Fahrbahnplatte zwei Hauptträger; bei breiterer Fahrbahnplatte oder beschränkter Bauhöhe sind mehr als zwei Hauptträger in einem Abstand von in der Regel 2,40 m bis ca. 3,60 m vorzusehen.

In der Regel werden für die Hauptträger gewalzte oder geschweißte I-Profile eingesetzt. Bei starker Torsionsbeanspruchung der Längsträger sind Hohlkastenquerschnitte eine wirtschaftliche Alternative. Standardmäßig finden Stähle mit einer Streckgrenze von 355 N/mm<sup>2</sup> (S355) Anwendung. Im Verbundbrückenbau setzen sich jedoch auch vermehrt Stähle mit einer Streckgrenze von 460 N/mm<sup>2</sup> (S460) durch.

Hierbei bringt der Einsatz des höherfesten Stahls S460 anstelle des traditionellen S355 eine deutliche Minderung des Konstruktionsgewichtes und eine entsprechende Senkung der Materialkosten. Die Verarbeitungskosten sinken ebenfalls: Beispielsweise fällt bei einem Vollstoß das Schweißvolumen der Stumpfnaht wesentlich geringer aus.

Zur Anpassung an das Längsprofil der Straße und zum Ausgleich der Durchbiegung unter ständiger Last sollten die Walzträger über die starke Achse, zur Anpassung an die Trasse über die schwache Achse, vorgebogen werden. Für Walzträger wird die Überhöhung in der Regel im Walzwerk durch Kaltverformen auf einer Presse realisiert. Für geschweißte Träger wird diese bereits beim Zusammensetzen der Querschnitte berücksichtigt. Die Längsträger von Einfeldbrücken liegen in der Regel frei auf den Widerlagern auf. Bei Mehrfeldbrücken werden die Längsträger als aneinandergereihte Einfeldträger oder als Durchlaufträger ausgeführt. Durchlaufträger sind statisch günstiger (kleinere Biegemomente und kleinere Verformungen) und bieten wichtige konstruktive Vorteile; so kann beispielsweise die Anzahl der Lager sowie die Anzahl der in der regelmäßigen Wartung teuren Fahrbahnübergangskonstruktionen wesentlich verringert werden.

Wenn die Gesamtlänge der Brücke sowie die Transport- und Montagegegebenheiten es erlauben, können die Längsträger als angearbeiteter Stab in voller Länge eingebaut werden. Ist ein Transport in endgültiger Länge nicht möglich, müssen die Längsträger auf der Baustelle biegesteif gestoßen werden. Als Baustellen-Längsstöße haben sich sowohl Schweißstöße, siehe Kapitel 7.2, als auch Schraubstöße mit Laschen, siehe Kapitel 7.3, bewährt.

Alternativ können Baustellen-Längsstöße mit Durchlaufwirkung durch Einbinden der Einfeldträger in einem Stahlbetonquerträger über den Lagern erfolgen, siehe Kapitel 6.

Die Fahrbahnplatte wird längs und quer schlaff bewehrt. Bei Mehrfeldbrücken ist im Bereich der Stützmomente die Längsbewehrung so auszulegen, dass die Rissbreitenbeschränkung gewährleistet ist.

Zur Abtragung der Horizontallasten und zur Stabilisierung werden die Längsträger über den Auflagern durch Querträger ausgesteift. Diese Querträger übernehmen in der Regel auch die Kräfte der Pressen, mit denen der Überbau zum Auswechseln der Lager angehoben wird.

Bei Zwei- und Dreifeldbrücken können die Beanspruchungen aus den Stützmomenten durch gezielte Stützensenkungen nach dem Abbinden des Betons planmäßig verringert werden.

Für Verbundbrücken werden in der Regel einfache Elastomerlager eingesetzt. Der Vorteil des geringen Konstruktionsgewichts der Verbundkonstruktion führt bei den lastabtragenden Bauteilen wie Widerlagern, Pfeilern und Gründungen (insbesondere Pfahlgründungen) zu kleineren Bauteilabmessungen. Die sich ergebenden Einsparungen bei den Baukosten sind charakteristisch für diese Bauweise.

### 2.3.2 | Fertigung, Transport und Montage

Die Anarbeitung der Träger – Ablängen bei Walzprofilen, Zusammensetzen bei geschweißten Querschnitten, Herstellen der Bohrungen, Biegen über die starke und ggf. schwache Achse, Aufschweißen der Auflagerplatten und Kopfbolzen, Qualitätssicherung und Zertifizierung sowie die Vorbereitung und auch vollständige Herstellung des Korrosionsschutzes – kann teilweise oder komplett im Stahlwerk und/oder in einer Stahlbauwerkstatt erfolgen. Bei einer Verzinkung ist ein Zwischentransport in eine Verzinkerei zusätzlich vorzusehen. Die einbaufertigen Träger werden mit der Bahn oder dem LKW zur Baustelle transportiert. Die einzelnen Bauteile sind relativ leicht und erfordern nur einfache Hebezeuge auf der Baustelle.

Oft werden die Träger in Paaren vormontiert, um den Montageeinheiten mehr Eigenstabilität zu verleihen. Die Träger oder Trägerpaare werden mit Bau- oder Autokranen entweder in ihrer geplanten, endgültigen Anordnung über der Brückenöffnung oder zum späteren Einschleiben auf einem gesonderten Montageplatz verlegt. Die geringen Massen der einzelnen Bauteile erlauben ein zügiges Verlegen; auf Hilfsunterstützungen kann meistens verzichtet werden. Verkehrsbehinderungen werden durch Transporte und Montagen während verkehrsarmer Tageszeiten weitestgehend vermieden.

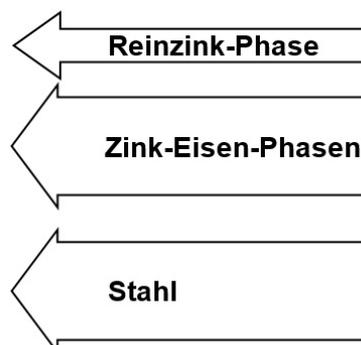
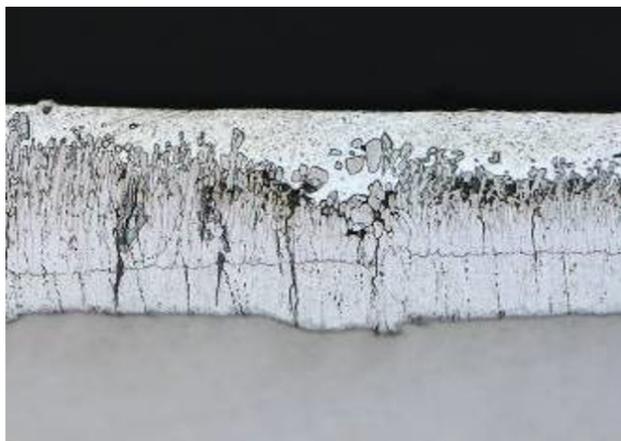


Bild 1: Mikroskopische Darstellung des Aufbaus einer im klassischen Stückverzinkungsprozess erzeugten Zinkschicht

## 3 | Dauerhaftigkeit stückverzinkter Komponenten

### 3.1 | Grundlagen der Stückverzinkung

Die Stückverzinkung ist ein traditionelles Korrosionsschutzverfahren, bei dem Stahlteile durch Eintauchen in eine flüssig-heiße Zinkschmelze einen metallischen Überzug erhalten. In Deutschland werden jährlich circa 2 Millionen Tonnen Stahl stückverzinkt, vornehmlich aus dem Bereich des Metall- und Stahlbaus, der Verkehrs- und Infrastruktureinrichtungen und des Nutzfahrzeugbaus. Die aktuellen Anlagenkapazitäten lassen Bauteillängen von bis zu maximal 19 m als Einfachtauchung sowie Einzelstückgewichte von bis ca. 10 Tonnen zu.

Der Verzinkungsprozess ist grundsätzlich charakterisiert durch eine nass-chemische Vorbehandlung, in der die Stahloberfläche von arteigenen und artfremden Verunreinigungen gesäubert wird, und dem anschließenden Verzinkungsprozess durch Eintauchen der Konstruktion in eine beim Normaltemperaturverfahren circa 450 °C heiße Zinkschmelze. Im Zinkbad wird das Bauteil mit Zink umschlossen, die Schmelze reagiert mit dem Stahl und bildet eine unlösliche, metallurgische Verbindung zwischen Zink und Stahl. Die so entstehenden Zink-Eisen-Legierungsphasen weisen in der Regel eine höhere Härte als der Stahl auf und sind deshalb besonders widerstandsfähig. Die Gesamtzinkschicht wird durch eine Reinzinkphase abgeschlossen, die sich beim Herausziehen des Bauteils aus der flüssigen Schmelze auflegt (Bild 1).

### 3.2 | Charakteristik der Zinkschicht

Eine im Stückverzinkungsprozess erzeugte Zinkschicht schützt die Stahlkonstruktion gleich in zweifacher Weise. Zunächst wirkt der Zinküberzug als Barriere und hält das angreifende Medium, z. B. salzhaltige Luft davon ab, mit dem Stahl direkt in Kontakt zu kommen und diesen anzugreifen (passiver Korrosionsschutz). Darüber hinaus hat Zink die zusätzliche Eigenschaft, über die kathodische Schutzwirkung aktiv Korrosionsprozesse an dem edleren Metall Eisen zu vermeiden (aktiver Korrosionsschutz). Hierbei wirkt Zink als Opferanode, das heißt, selbst wenn die Schutzschicht in begrenztem Maße verletzt wird, findet kein Angriff des Stahls statt, da sich das unedlere Element Zink stattdessen aufopfert und somit der Stahl geschützt wird.

Die Ausbildung der Zinkschicht erfolgt über den Prozess der Thermodiffusion, also den Austausch von Zink- und Eisenatomen während der Verweilzeit der Stahlkonstruktion in der Zinkschmelze und die damit verbundene Bildung der Zink-Eisen-Legierungsphase. Wie dick die Zinkschicht während der Verzinkung aufwächst, ist sowohl abhängig vom verwendeten Werkstoff, der konstruktiven Gestaltung als auch den Verzinkungsprozessparametern:

1. Einfluss des Grundwerkstoffs  
Die Reaktion zwischen Zink und Eisen wird maßgeblich gesteuert über die Reaktivität des Stahls, die wiederum von der chemischen Zusammensetzung, insbesondere den Silizium- und Phosphor-Anteilen des Stahls und der Verzinkungstemperatur abhängt. In Bild 2 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt.
2. Konstruktive Gestaltung  
Die Art der Konstruktion sowie die eingesetzten Blechdicken und Langmaterialabmessungen haben Einfluss auf die notwendige Verzinkungszeit. Bei massiven Konstruktionen ist eine längere Verweilzeit in der Zinkschmelze erforderlich als bei Dünnmaterial, entsprechend lang ist die Reaktionszeit zwischen Zink und Eisen, was zu dickeren Zinküberzügen führt.
3. Verzinkungstemperatur  
Die Prozesstemperatur hat prinzipiell einen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. In der Praxis finden sich aber branchenweit kaum Unterschiede, die übliche Verzinkungstemperatur liegt bei 445 °C – 455 °C, so dass dieser Parameter von geringerer Relevanz ist.

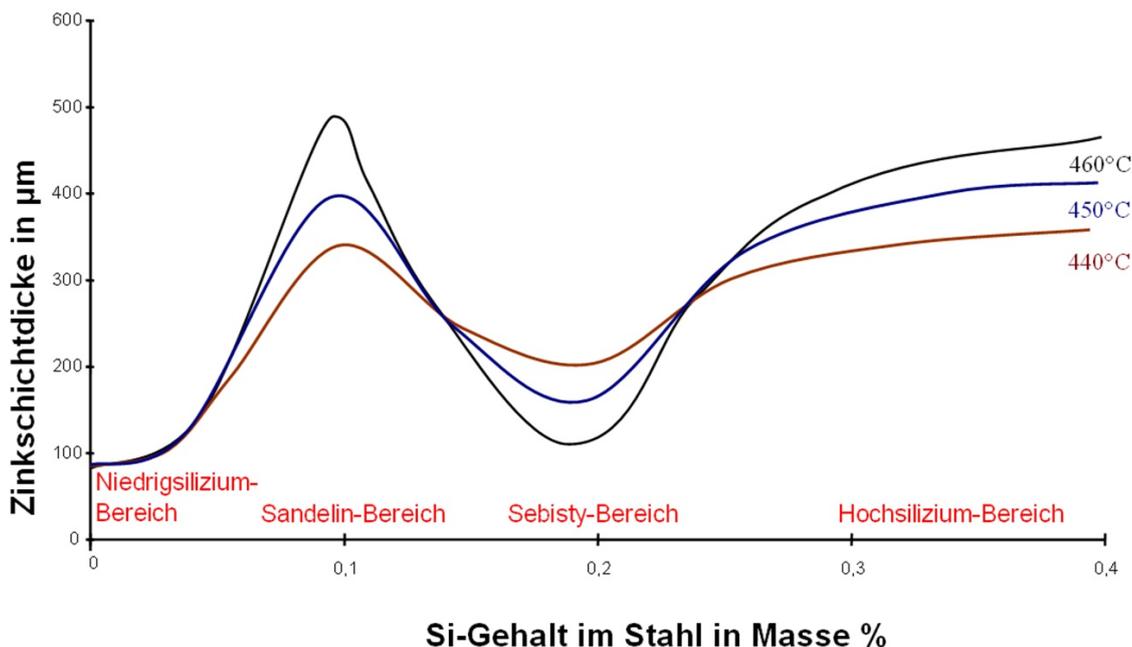


Bild 2: Einfluss des Si-Gehaltes im Stahl auf die Dicke der Zinküberzüge (Tauchdauer: 10 min, Phosphor < 0,02 Masse-%) [3]

In DIN EN ISO 1461 [9] werden Mindestzinkschichtdicken in Abhängigkeit von der Dicke des Grundmaterials angegeben. Bei stahlbautypischen Materialdicken > 6 mm beträgt der Mindestwert der durchschnittlichen Schichtdicke 85 µm. In der Praxis sind Dicken zwischen 100-300 µm üblich. Je nach gewünschter Standdauer unter der projektspezifischen, korrosiven Belastung sind gegebenenfalls über die genormten Mindestwerte hinausgehende Zinkschichtdicken festzulegen. In diesem Fall ist zu empfehlen, die Erreichbarkeit der geforderten Schichtdicke durch Arbeitsproben vorher abzusichern.

### 3.3 | Auslegung des Korrosionsschutzes

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit, also die zeitliche Beständigkeit einer Stahlkonstruktion, ist grundsätzlich die Gesamtheit aus gewählttem Korrosionsschutzsystem und der korrosiv wirkenden Umgebung am Einsatzort zu betrachten. Hierbei sollte bei der Projektplanung die standortspezifische Korrosionsbelastung, auch unter Einbeziehung möglicher mikroklimatischer Belastungen, durch einen Fachmann bewertet werden. Je nach Aggressivität der angreifenden Medien wird eine Zinkschicht in einem gewissen Maße abgetragen, sie verbraucht sich also über die Zeit. Auskunft über das Maß der Abtragung im Fall von atmosphärischer Korrosion gibt DIN EN ISO 12944-2 [10]. Basierend auf der Luftbelastung mit Chloriden und Sulfiden findet hier eine Klassifizierung der Umweltbedingungen in sogenannte Korrosivitätskategorien mit Angabe von entsprechenden Zink-Abtragsraten in µm pro Jahr statt (Tabelle 1).

Im Zuge der Planung eines Brückenbauwerkes bieten somit die festgelegte Mindest-Zinkschichtdicke sowie die normbasierten Abtragsraten gemäß [10] eine sehr gute Grundlage zur Abschätzung der wartungsfreien

Standdauer der Konstruktion und damit ein hohes Maß an Planungssicherheit. Wird eine Zinkschichtdicke von 200 µm unterstellt, ergibt sich unter der Annahme eines linearen Zinkabtrags beispielsweise im C3-Klima eine zu erwartende Standzeit des Korrosionsschutzes von mindestens 95 - 285 Jahren (Abtrag 2,1 µm/a bzw. 0,7 µm/a), für eine C4-Belastung mit bis zu 4,2 µm/a von 47 Jahren.

Bei den in Tabelle 1 angegebenen Werten ist jedoch zu beachten, dass es sich um den Zinkabtrag handelt, der an Prüfmustern nach einem Jahr gemessen wurde und damit in dem zeitlichen Abschnitt, in dem die Abtragswerte am höchsten sind. Der Zutritt von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zur Zinkoberfläche hat einen signifikanten Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit. Es werden unter Anwesenheit von CO<sub>2</sub> sowohl basische Zinkcarbonatschichten als auch Korrosionsprodukte mit guten Schutzeigenschaften für die darunter liegenden Zinkschichten gebildet. Unter normalen atmosphärischen Bedingungen können somit die Korrosionsprodukte selbst die Korrosionsgeschwindigkeit wesentlich bremsen, indem sie Deckschichten bilden und Fehlstellen z.B. Poren verschließen [11]. Es stellt sich ein asymptotischer Verlauf des Zinkabtrags über die Zeit ein (vgl. Bild 3). Somit fällt die Abschätzung der wartungsfreien Standdauer eines Zinküberzuges auf der Basis der Annahme eines linearen Abtrags konservativ aus.

Ein weiterer wesentlicher Faktor für die Abtragsgeschwindigkeit ist der Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)-Gehalt in der Atmosphäre. Die starke korrosive Wirkung von Schwefeldioxid auf Zinküberzüge an der Atmosphäre lässt sich vor allem auf zwei Effekte zurückführen [12]:

1. der Zutritt von Schwefeldioxid führt zu einer Erniedrigung des pH-Wertes
2. Zinksulfate sind leicht lösliche Korrosionsprodukte

Tabelle 1: Einteilung der Korrosivitätskategorien gemäß DIN EN ISO 12944-2 [10]

Korrosivitätskategorie	Einstufung der Belastung	zu erwartende Zink-Abtragsrate [µm/a]
C1	sehr niedrig	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$
C2	niedrig	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$
C3	mittel	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2,1$
C4	hoch	$2,1 < r_{\text{corr}} \leq 4,2$
C5 (-Industrie / -Meer)	sehr hoch	$4,2 < r_{\text{corr}} \leq 8,4$

Schon bei einem leichten Anstieg der SO<sub>2</sub>-Konzentration führt dies zu einem stärkeren Angriff auf den Zinküberzug. Allgemein ist jedoch festzuhalten, dass die Luftbelastung in Deutschland und Europa in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich geringer geworden ist, insbesondere die SO<sub>2</sub>-Belastung. Im Großteil des Bundesgebiets liegen die Zinkabtragsraten mittlerweile bei Werten von circa 1 µm/a, teilweise deutlich darunter, und damit im Bereich der Korrosivitätskategorien C2 und C3.

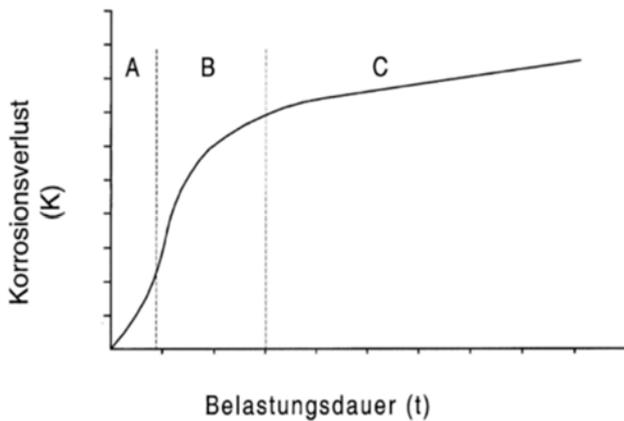


Bild 3: Schematische Darstellung des Zinkabtrags über die Zeit [13]

Zur Erfassung des in Bild 3 dargestellten Zusammenhangs und damit zur Abschätzung der Schutzdauer unter Ansatz eines realistischeren Zinkabtrags kann die folgende Formel (3.1) nach EN ISO 9224 [14] angewendet werden:

$$D_{tZn} = r_{corr,tZn} \cdot t^b \quad (3.1)$$

mit:

t: Auslagerungsdauer, ausgedrückt in Jahren

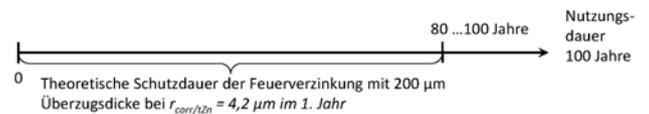
b: der für Zink und Umgebung spezifische Zeitexponent, üblicherweise kleiner eins

$r_{corr,tZn}$  die Korrosionsgeschwindigkeit des Zinks, die im ersten Jahr vorliegt, ausgedrückt in Gramm je Quadratmeter und Jahr [g/(m<sup>2</sup> · a)] oder in Mikrometern je Jahr [µm/a], nach ISO 9223 [15]

Bei einer beispielhaft angenommenen Zinkschichtdicke von 200 µm ergibt sich danach in einer C4-Atmosphäre mit einem nominellen Zinkabtrag von bis zu 4,2 µm/a eine erwartete Schutzdauer von mindestens 83 Jahren (3.2). Dies ist deutlich länger als die konservativ mit linearem Abtrag bestimmten 47 Jahren.

$$\sqrt[b]{\frac{D_{tZn}}{r_{corr,tZn}}} = t = 0,873 \sqrt{\frac{200 \mu\text{m}}{\text{max. } 4,2 \mu\text{m}}} \geq 83,5 \text{ Jahre} \quad (3.2)$$

Daraus ergibt sich folgende Empfehlung: Zur Erreichung einer Standzeiterwartung in der Größenordnung der Lebensdauer einer Brücke von 100 Jahren sollte unter mäßiger Korrosionsbelastung eine Mindestzinkschichtdicke von 200 µm erzielt werden. Unter Umständen muss dabei unter aggressiveren atmosphärischen Bedingungen eine Instandsetzung des Korrosionsschutzes nach ca. 80 Jahren erfolgen (Bild 4).



gemäß DIN EN ISO 9224  $D_{zinc} = r_{corr,tZn} \cdot t^b$   
t = 100 Jahre; b = 0,873  
 $t^b = 55,719$  (Tabelle 3; Zink; B2)

gemäß ISO 9223 Ermittlung  
 $r_{corr/zink} = 2,1 \dots 4,2 \mu\text{m im 1. Jahr}$   
Korrosivitätskategorie = C4

Bild 4: Theoretische Schutzdauer einer Feuerverzinkung (200 µm) [13]

Wenn sich jedoch der Trend der weiteren Verbesserungen der atmosphärischen Verunreinigung fortsetzt, ist sogar mit einer längeren Schutzdauer zu rechnen.

In der Praxis stellen Zinkschichtdicken von > 200 µm bei feuerverzinkten Stahlbauteilen eher die Regel, als die Ausnahme da.

### 3.4 | Ausbesserung von Zinkschichten

#### 3.4.1 | Allgemeines

Die Herstellung der Stückverzinkungsüberzüge erfolgt vollständig im Werk durch den oben beschriebenen Prozess. Infolge von prozess- oder konstruktionsbedingten Fehlstellen, transport- oder montagebedingten Beschädigungen, der Notwendigkeit späterer schweißtechnischer Arbeiten an bereits verzinkten Komponenten oder im Fall einer abgetragenen Zinkschicht, z.B. infolge punktuell erhöhter Korrosion, kann eine lokale Ausbesserung der Zinkschicht erforderlich sein.

Als Verfahren ist hierfür gemäß DIN EN ISO 1461 [9] das thermische Spritzen mit Zink (Spritzmetallisierung/ Spritzverzinkung) nach DIN EN ISO 2063 [16] anzuwenden, wobei die nachfolgend dargestellten Vorgaben einzuhalten sind. Die Verwendung von anderen Ausbesserungsverfahren wird für den Brückenbau nicht empfohlen. Zinkstaubgrundbeschichtungsstoffe nach ZTV-ING [5] bzw. den TL/TP-KOR-Stahlbauten [6] Anhang E Blatt 87 bzw. Blatt 89 sind aufgrund der geforderten besonders langen Schutzdauer nicht geeignet, da diese Beschichtungen aufgrund allgemeiner Praxiserfahrung nur eine Schutzdauer von 10 bis 20 Jahren haben. Des Weiteren sind Zinklote und Zinksprays für die Ausbesserung von Fehlstellen in stückverzinkten Bauteilen ebenfalls ungeeignet.

Die Ausbesserung der verzinkungsprozessbedingten Fehlstellen hat in der Feuerverzinkerei zu erfolgen, die Reparatur von Transportschäden sowie die Ergänzung des Korrosionsschutzes an Montageschweißstößen können auf der Baustelle erfolgen. Die zur prozesssicheren Ausführung notwendige Baustelleneinrichtung (Einhausung, kontrollierte relative Luftfeuchtigkeit, etc.) ist sicherzustellen und mit einzukalkulieren.

### 3.4.2 | Oberflächenvorbereitung

Für die durch thermisches Spritzen auszubessernden Flächenbereiche ist stahlseitig der Vorbereitungsgrad P3 gemäß DIN EN ISO 8501-3 [17] bzw. DIN EN 1090-2 [18] auszuführen. Um einen guten Anschluss zur Stückverzinkungsschicht zu schaffen, ist die an den unverzinkten Bereich angrenzende, intakte Zinkschicht in Form eines leichten Strahlens (Sweepen) ebenfalls vorzubereiten.

Auf Stahl ist eine Rautiefe mit minimal  $R_{y5} = 85 \mu\text{m}$  (G) mit einem Oberflächenvorbereitungsgrad Sa3 und auf der Feuerverzinkung mit maximal  $R_{y5} = 40 \mu\text{m}$  (G) zu erreichen. Es sind geeignete Verfahren zu verwenden, ggf. sollte eine entsprechende Arbeitsprobe angefertigt werden. Bezüglich der konkreten Ausführung siehe auch Kap. 7.2.

Zur Vermeidung von Beschädigungen der bestehenden Zinkschicht außerhalb der lokalen Oberflächenvorbereitung ist eine Maskierung der Feuerverzinkung

vorzusehen. Diese ist jedoch nur für die scharfe Abgrenzung der Spritzmetallisierung und Versiegelung zur Feuerverzinkung notwendig. Die Maskierung verbleibt bis zur Fertigstellung der Spritzmetallisierung auf der Feuerverzinkung und muss eine entsprechende Haltbarkeit aufweisen.

### 3.4.3 | Spritzmetallisierung

Die Spritzmetallisierung ist nach den Vorgaben der DIN EN ISO 2063 [16] zu applizieren.

Die gestrahlten und gesweepen Flächenbereiche sind nach der Oberflächenvorbehandlung innerhalb von vier Stunden durch Spritzmetallisieren zu beschichten. Die Spritzmetallisierung ist überlappend auf dem intakten Zinküberzug mit einer Überlappungsbreite von mindestens 30 mm auszuführen.

Bezüglich der konkreten Ausführung siehe auch Kap. 7.2.

### 3.4.4 | Porenschließende Versiegelung

Nach der Spritzmetallisierung ist gemäß ZTV-ING Teil 4, Abschnitt 3 [5] zeitnah eine porenschließende Beschichtung (Versiegelung) auf die spritzmetallisierten Flächenbereiche zu applizieren.

Nach der Versiegelung ist die Ausbesserung des Korrosionsschutzsystems Feuerverzinkung durch Spritzmetallisieren abgeschlossen und der Schutz (Maskierung) der intakten Feuerverzinkung ist zu entfernen.

Bezüglich der konkreten Ausführung siehe auch Kap. 7.2.

## 3.5 | Duplex-Systeme

Unter Duplex-System versteht man im Bereich des schweren Korrosionsschutzes die Kombination einer Feuerverzinkung mit einer zusätzlich applizierten organischen Beschichtung. Diese kann als Nass- oder Pulverbeschichtung ein- oder mehrschichtig ausgeführt werden.

Die Idee der Duplex-Systeme ist die Schaffung speziell abgestimmter Korrosionsschutzlösungen durch Ergänzung der Korrosionsschutzcharakteristik des einen Systems mit derjenigen des anderen. Diese Systeme finden insbesondere dort Anwendung, wo folgende Aufgabenstellungen vorliegen:

a. Erhöhung der Dauerhaftigkeit.

Hier spielen insbesondere Anwendungsbereiche eine Rolle, in denen aufgrund spezifischer, häufig lokal begrenzter Sonderbelastungen ein erhöhter Zinkabtrag zu erwarten ist, z.B. im Bereich erhöhter Chemikalienbelastung, besonderer Tausalzstreuung oder Dauerfeuchte. Durch die Kombination kann die Korrosionsschutzdauer um den Faktor 1,2 – 2,5 gegenüber der Summe der Schutzdauern der beiden Einzelsysteme erhöht werden.

b. Ästhetische Gestaltung.

Über die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Beschichtungen kann die Möglichkeit der Farbgebung einer Konstruktion genutzt werden, ohne auf die Eigenschaften der Zinkschicht als hochwertiger Korrosionsschutz verzichten zu müssen.

Für den Brückenbau spielen ausschließlich Duplex-Systeme unter Verwendung einer Nasslack-Beschichtung eine Rolle. Je nach Aufgabenstellung kann ein mehrschichtiger Aufbau mit einer Dicke von 120 – 240 µm ausgeführt werden, wobei in der Regel die Grund- und gegebenenfalls die Zwischenbeschichtung im Werk sowie die Deckbeschichtung vor Ort ausgeführt wird.

Bei der Ausführung ist darauf zu achten, dass ein auf feuerverzinkten Untergrund abgestimmtes Beschichtungssystem verwendet wird. Empfehlungen zur Systemauswahl bieten DIN EN ISO 12944-5 [7], Tab. A.7 für die Korrosivitätskategorien bis C5 und die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten: ZTV-ING [5], Teil 4 Stahlbau, Stahlverbundbau. Vor Applikation der Grundbeschichtung muss eine gute und ausreichende Vorbereitung der verzinkten Oberfläche erfolgen, z.B. durch Sweep-Strahlen. Es sind grundsätzlich die spezifischen Verarbeitungshinweise des Beschichtungstoffherstellers zu beachten.

### 3.6 | Kontakt mit Beton

Durch Reaktion des Zinks mit feuchtem Beton bilden sich Wasserstoff und Calciumhydroxyzinkat. Dieses Korrosionsprodukt ist unlöslich und schützt das darunter liegende Zink (vorausgesetzt, das umgebende Betongemisch hat einen pH-Wert von unter etwa 13,3) [19].

Untersuchungen haben gezeigt, dass während dieser ersten Reaktionsperiode ein Teil der reinen Zinkschicht des Überzugs gelöst wird, bis eine Passivierung des Überzugs und eine Betonhärtung einsetzen. Diese Anfangsreaktion endet jedoch mit dem Aushärten des Betons und der Bildung einer Hydroxyzinkatschicht. Untersuchungen an verzinktem Bewehrungsstahl, der aus bereits verarbeiteten Konstruktionen entnommen wurde, weisen auf eine längere Beibehaltung des passiven Zustands des Überzugs hin, auch wenn hohe Chloridgehalte in der Umgebung des Betons eine Belastung darstellen [19].

Der Zinküberzug kann für Betonsorten mit hohem pH-Wert oder, wenn ein hoher Chlorideintrag erwartet wird, durch geschützte Nachbehandlungen passiviert werden, um ihn gegen übermäßige Wasserstoffbildung zu schützen [19].

## 4 | Grundlagen zur verzinkungsspezifischen Bemessung und Konstruktion

### 4.1 | Allgemeines

Im Folgenden werden die bemessungs- und konstruktionsrelevanten Hintergründe und Grundsätze erläutert, die bei der Bemessung und konstruktiven Gestaltung des Stahl- oder Verbundbrückentragwerks in feuerverzinkter Ausführung zu beachten sind. Die Konstruktionsanweisungen sind als Ergänzung zu den allgemeinen Konstruktionsprinzipien des Stahl- und Verbundbrückenbaus zu verstehen.

## 4.2 | Normative Regelungen

Als normative Grundlagen der in dieser Broschüre getroffenen Empfehlungen gelten die europäischen Regelwerke für den Stahl- und Verbundbrückenbau. Die Normen, die durch die Verzinkung der Brückenelemente betroffen sind, sowie für die Stückverzinkung, sind wie folgt:

DIN EN 1993-1-9 [20]  
DIN EN 1993-2 [21]  
DIN EN 1994-2 [22]  
DIN EN ISO 1461 [9]  
DIN EN 10025 [23]  
DIN EN ISO 12944 [24]  
DIN EN ISO 14713 [19]

Ergänzend gilt auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland für tragende Bauteile, und somit auch für die Ausführung eines Brückenbauwerks, die DAST-Richtlinie 022 [25].

Für Verkehrsbauten unter der Hoheit des Bundes und der Länder in Deutschland sind zusätzlich die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingung für Ingenieurbauwerke (ZTV-ING [5]) zu beachten. Diese können auch für andere Bauwerke vereinbart werden.

Vor dem Hintergrund der aktuellen Regelungen in der DAST-Richtlinie 022 (Stand 2009) [25] und der ZTV-ING [5] (Stand August 2015), die eine Feuerverzinkung für den Fall zyklischer und dynamischer Belastungen von tragenden Komponenten nicht vorsehen, ist vor der Ausführung einer feuerverzinkten Brücke eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bei den zuständigen Behörden einzuholen.

Sonstige länderspezifische Vorgaben und Regelungen außerhalb der Bundesrepublik Deutschland sind vom Planer rechtzeitig zu prüfen und zu berücksichtigen.

## 4.3 | Bemessungsrelevante Besonderheiten bei der Verzinkung

Die Ausbildung einer Zinkschicht erfolgt durch die metallurgische Verbindung zwischen Zink und Stahl (Bildung einer Zink-Eisen-Legierungsschicht). Hierbei hat die Charakteristik der entstandenen Zinkschicht Einfluss auf

1. das Ermüdungsverhalten des Grundwerkstoffs und der konstruktiven Details sowie
2. das Verschraubungsverhalten stückverzinkter Komponenten.

Bezüglich des Ermüdungsverhaltens wirken sich Mikro-Erstarrungsrisse, die stets in einem gewissen Umfang beim Abkühlen der Konstruktion nach dem Verzinken innerhalb der Zinkschicht entstehen und ihre Ursache im unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Zink und Stahl haben, negativ aus. Die Ergebnisse aus [3] lassen jedoch den Schluss zu, dass der Effekt dieser Mikrokerben mit zunehmender Schärfe der konstruktiven Kerbe hinter dieser zurücktritt. Zur allgemeinen Berücksichtigung im Zuge der Bemessung wird eine Abminderung um bis zu einen Kerbfall erforderlich (siehe dazu Kap. 5.3).

Bezüglich des Verschraubungsverhaltens führt die Zinkschicht zu einer Reduzierung des Reibbeiwertes. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, sind entsprechende Maßnahmen erforderlich (siehe dazu Kapitel 5.2).

## 4.4 | Konstruktionsrelevante Besonderheiten bei der Verzinkung

### 4.4.1 | Grundlegende Aspekte

Bei der Gestaltung von Stahlkonstruktionen, die verzinkt werden sollen, sind für den Konstrukteur zwei Aspekte von besonderer Bedeutung und entsprechend zu beachten:

#### a. Die Stückverzinkung ist ein Tauchverfahren.

Bezüglich der realisierbaren Abmessungen und Gewichte unterliegt die Konstruktion den anlagentechnischen Beschränkungen des Verzinkungsbetriebes (Tauchbäder und Hebezeuge). Für Brückentragwerke wird aus diesem Grund eine Segmentierung der Gesamtkonstruktion erforderlich werden, so dass auch schon bei kurzen Spannweiten planmäßig Montagestöße vorzusehen sind (zur Ausbildung des Korrosionsschutzes im Stoßbereich siehe Kap. 3.4). In Deutschland liegen übliche und flächendeckend verfügbare Anlagenkapazitäten von Großverzinkereien bei Kesselmaßen von ca. 16 x 1,8 x 2,8 m (L x B x T, Einzelabmessung) und 10 Tonnen Hublast, an einzelnen Standorten auch darüber hinaus.

Es sind Anschlagpunkte für den Transport im Verzinkungsbetrieb und den eigentlichen Verzinkungsprozess vorzusehen.

Die flüssigen Prozessmedien (Vorbehandlungsflüssigkeiten, Zinkschmelze), in die die Konstruktion eingetaucht wird, müssen die gesamte Oberfläche des Bauteils jeweils vollständig benetzen, beim Ausziehen aus dem jeweiligen Prozessbad jedoch auch wieder vollständig abfließen können. Entsprechend sind Ein-, Durch- und Auslauföffnungen für die Flüssigkeiten als auch Entlüftungsöffnungen zur Vermeidung von Lufteinschlüssen vorzusehen.

#### **b. Die Stückverzinkung ist ein Prozess bei höheren Temperaturen.**

Aufgrund der Wärmeeinwirkung von ca. 450°C dehnt sich die Konstruktion in der Zinkschmelze um ca. 4,5 mm/m aus. Dabei geht die Dehnungsentwicklung einher mit der zunehmenden Durchwärmung des Materials, welche wiederum von der Blechdicke sowie der Eintauchgeschwindigkeit beeinflusst wird und in Abhängigkeit von diesen Parametern über die Gesamtbauteilgeometrie ungleichmäßig erfolgen kann. Es ist abzuschätzen, wie sich die Konstruktion unter einer solchen Belastung verhält (Verformungsverhalten) und wo möglicherweise Zwängungen infolge ungleichmäßiger Ausdehnung auftreten können.

Im Verhältnis zur Raumtemperatur wird der Elastizitätsmodul E des Grundwerkstoffs mit zunehmender Erwärmung bis auf circa 50 - 60 % bei 450 °C reduziert. Die daraus resultierende Reduktion der Dehn- und Biegesteifigkeit kann in Kombination mit den material- und fertigungsbedingten Eigenspannungen zum Freiwerden derselben führen.

Die Konstruktion schrumpft wieder nach dem Herausziehen aus der Zinkschmelze und dem parallel einsetzenden Abkühlen unter gleichzeitiger, vollständiger Wiedergewinnung der Festigkeit.

#### **4.4.2 | Grundlagen des feuerverzinkungsgerechten Konstruierens**

Feuerverzinkte Stahlkonstruktionen haben sich im Stahlhochbau, d.h. unter vorwiegend ruhender Beanspruchung, aufgrund ihrer Langlebigkeit bewährt. Zur Erreichung eines optimalen Korrosionsschutzes mit Hilfe der Feuerverzinkung müssen neben der korrosionsschutzgerechten Gestaltung nach DIN EN ISO 12944-3 [24] und DIN EN ISO 14713-1 [19] im Prozess des Feuerverzinkens zusätzliche Anforderungen entsprechend der feuerverzinkungsgerechten Konstruktion nach DIN EN ISO 14713-2, Anhang A [19] und DASt-Richtlinie 022 [25] berücksichtigt werden.

##### **Entlüftungs-, Zu- und Ablauföffnungen**

Die Konstruktion ist mit hinreichend großen Freischnitten und Durchflussöffnungen zu versehen, an evtl. Rippen in Form von Kreisschnitten. Die Durchflussöffnungen an den Endfeldern sind im Steg ebenfalls als Kreisschnitt mit mindestens 50 mm Durchmesser auszuführen.

Zur Reduzierung der Belastung sollten die Einlauf- und Entlüftungsöffnungen in ausreichender Anzahl und Größe in die Konstruktion eingebracht werden, insbesondere bei Hohlprofilen. Hierdurch wird ein möglichst schnelles Eintauchen in die Zinkschmelze gewährleistet, was wiederum die Ungleichmäßigkeit der Temperaturentwicklung über die Bauteilhöhe und damit die induzierten Spannungen minimiert. Natürlich gilt es hier, das statisch machbare mit dem verzinkungstechnisch notwendigen abzustimmen.

Bei der Ausführung der Öffnungen ist auf die Einhaltung der Vorgaben hinsichtlich der Schnittkantenqualität gemäß EN 1090-2 [18] zu achten.

##### **Blehdicken, Blehdickenverhältnisse, Steifigkeitssprünge**

Die thermische Belastung beim Verzinkungsprozess kann an konstruktiven Kerben, insbesondere im Bereich von Dicken- und Steifigkeitssprüngen, zu einer lokalen Konzentration von Spannungen oder zu Relativverformungen führen, woraus lokale Überbelastungen des Grundmaterials resultieren können [26].

Zu deren Vermeidung sei auf die Regeln und Empfehlungen der DAST-Richtlinie 022 [25] verwiesen. Abweichend davon wird möglichst die Einhaltung eines Blechdickenverhältnisses von  $t_{\max}/t_{\min} \leq 2,5$  empfohlen.

### **Maximale Bauteilgröße**

Die maximal möglichen Bauteilabmessungen sind mit dem Verzinkereibetrieb abzustimmen.

Mehrfachtauchungen sollten vermieden werden.

### **Oberflächengüte, Schnittkanten**

Die Oberflächengüte der verwendeten Walzprofile und Bleche muss DIN EN 10163-2 [27], Klasse B, Untergruppe 3 entsprechen. Vor dem Feuerverzinken ist die Konstruktion nach P-Vorbereitungsgrad P3 (sehr gründliche Vorbereitung) gemäß DIN EN ISO 8501-3 [17] vorzubereiten. Dabei sind beispielsweise unbehandelte thermisch geschnittene Kanten unzulässig und alle Kanten müssen mit einem Mindestradius von 2 mm gerundet sein. Auf die Rundung von gewalzten Kanten an Profilen und Blechen kann verzichtet werden. Hierfür ist der P-Vorbereitungsgrad P2 (gründliche Vorbereitung) ausreichend.

### **Biegen und Umformen**

Die Verwendung von kaltverformten und kaltumgeformten Bauteilen mit einem Verformungsgrad über dem in [25] angegebenen maximalen Maß hinaus, ist unzulässig.

### **4.4.3 | Vermeidung von eigenspannungsbedingtem Verzug**

Verantwortlich für einen unter Umständen auftretenden Verzug beim Feuerverzinken ist der Abbau von Eigenspannungen als Folge der Erwärmung der Stahlteile im Zinkbad, das eine Temperatur von ca. 450 °C hat (vgl. 4.4.1). Bei dieser verringert sich die Streckgrenze des Stahls gegenüber den Werten bei Raumtemperatur – je nach Stahlsorte – auf etwa 60 - 80%.

Bei sehr hohen Eigenspannungen in einer Stahlkonstruktion kann es unter Umständen dazu kommen, dass sich vorhandene Spannungsspitzen durch plastische Formänderung abbauen. Liegen nämlich die Eigenspannungen einer Konstruktion erheblich oberhalb der während des Feuerverzinkens vorübergehend verringerten Streckgrenze des Stahls, so kann der Stahl diese Eigenspannungen nicht mehr aufnehmen. Die Spannungen werden als plastische Formänderung abgebaut – es entsteht Verzug.

Eigenspannungen sind in jeder Stahlkonstruktion mehr oder weniger ausgeprägt vorhanden und im Regelfall beim Feuerverzinken völlig unproblematisch.

Eigenspannungen, die zum Beispiel in Form von Walz-, Verformungs- oder Schweißspannungen in einer Konstruktion vorhanden sein können, stehen normalerweise untereinander im Gleichgewicht und geben zu einer Verformung zunächst keinen Anlass. Durch das Einbringen der Wärme beim Feuerverzinken kann dieser Zustand jedoch gestört werden und es können Verformungen die Folge sein.

In Hinblick auf das feuerverzinkungsgerechte Konstruieren und den nachfolgenden Feuerverzinkungsprozess ist ein Schweißfolgeplan zur spannungsarmen Fertigung zu erarbeiten. Symmetrische Profilquerschnitte, symmetrische Anordnung der Schweißnähte, keine größere Dimensionierung der Schweißnähte als notwendig und die Auswahl eines Schweißverfahrens mit geringer Streckenenergie sind die wesentlichen Maßnahmen zur Reduzierung der Verzugsgefahr. Die festgelegte Schweißreihenfolge ist vor dem Hintergrund der späteren Montage bei allen Bauteilen identisch auszuführen.

### **4.4.4 | Vermeidung von Verzug infolge unterschiedlichen Abkühlungsverhaltens**

Neben dem Freiwerden von fertigungsbedingten Eigenspannungen liegt im unterschiedlichen Abkühlverhalten einzelner Komponenten stückverzinkter Schweißkonstruktionen eine weitere maßgebliche Ursache für eventuell auftretende Verzugserscheinungen. Hierbei tritt der Effekt auf, dass die schneller abkühlenden, schlanken Komponenten, oder allgemein Bauteile mit einem großen Oberflächen-Volumen-Verhältnis, früher ihre ursprüngliche, temperaturabhängige Steifigkeit wiedererlangen und durch die verzögert abkühlenden, massigeren Bauteilbereiche unter Druckspannung geraten und somit, je nach Verlauf der Temperatur- und Steifigkeitsentwicklung, ein lokales Stabilitätsproblem auftreten kann.

Zur Vermeidung dieser Effekte ist insbesondere die Vermeidung von Blechdickenunterschieden, die konstruktive Vorsehung zwängungsfreier thermischer Verformungsmöglichkeiten sowie eine günstige Lagerung während des Abkühlvorgangs wichtig [28].

## 4.5 | Materialwahl

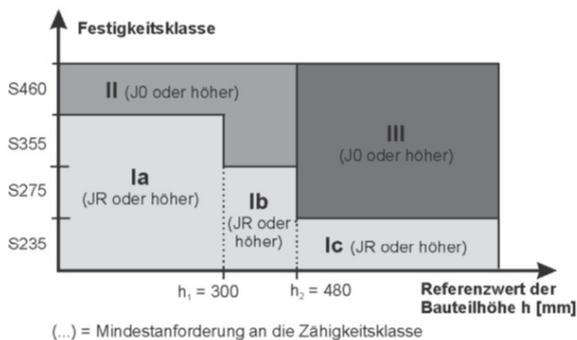
Bei der Stahlgütewahl ist zunächst die Bestellspezifikation gemäß DIN EN 10025 [23] „Feuerverzinken“ zu berücksichtigen.

Vor dem Hintergrund des in Kapitel 3.2 dargestellten Zusammenhangs zwischen der chemischen Zusammensetzung des Stahls und der resultierenden Zinkschichtdicke sowie im Hinblick auf die Erreichung einer notwendigen Mindestzinkschichtdicke ist eine Konkretisierung der Si- und P-Gehalte zu empfehlen (siehe hierzu auch Tabelle 1 in DIN EN 14713-2 [19]).

Für eine angestrebte Zinkschichtdicke von mindestens 200 µm ist ein Stahl mit einem Silizium-Gehalt im Bereich von  $0,14 \leq \text{Si} \leq 0,35 \%$  sowie einem Phosphor-Gehalt  $\text{P} \leq 0,035\%$  zu verwenden. Zur Prüfung der praktischen Realisierbarkeit der angestrebten Zinkschichtdicke ist die Durchführung von Arbeitsproben vorab empfehlenswert. Zur Vermeidung von ungleichmäßigem Aussehen sollten die Si- und P-Gehalte bei allen verwendeten Blechen und Profilen innerhalb der oben genannten Grenzen ähnlich sein.

Hinsichtlich der erforderlichen Bruchzähigkeit sind zusätzlich zu den Anforderungen der Brückennormung [21] [29] die Anforderungen entsprechend Tabelle 3 der DASt-Richtlinie 022 [25] zu beachten, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Wahl der Stahlgüte in Abhängigkeit des Referenzwerts der Bauteilhöhe und der Festigkeitsklasse



### Legende:

- Klasse Ia: Profile (offene Profile und Hohlprofile)
- Klasse Ib: Profile IPE und HE-Reihe oder ähnliche <sup>1)</sup>
- Klasse Ic: Profile IPE und HE-Reihe oder ähnliche <sup>1)</sup>
- Klasse II: Profile IPE und HEA-Reihe oder ähnliche <sup>1)</sup>
- Klasse III: Profile IPE und HEA-Reihe oder ähnliche <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Für geschweißte Profile mit ähnlichen Abmessungen wie die gewalzten Profile.

**Anmerkung:** Die Referenzwerte der Bauteilhöhe sind für dünnwandige, hochstellige Profile mit  $h/t_w \approx 40$  ermittelt worden. Von einer infolge der trägeren Durchwärmung denkbaren Erhöhung der Grenzwerte  $h_1$  und  $h_2$  bei  $h/t_w < 40$  ist abgesehen worden.

Hinweis: HEB, HEM und HL Profile sind durch die DASt-Richtlinie 022 [25] auf der sicheren Seite mit HEA abgedeckt.

Bauteile mit stark verzunderten Oberflächen oder starkem Rostansatz sollten vor dem Verzinken gestrahlt werden ( $\text{Sa } 2\frac{1}{2}$ ), um kurze Beizzeiten in der Verzinkerei zu ermöglichen.

## 4.6 | Transport

Beim Verladen sind die für den Transport vorgesehenen Anschlagpunkte oder Hebeösen, siehe Bild 5, zu verwenden.

Um eine Gefahr von Abplatzungen bei sehr hohen Schichtdicken infolge örtlicher, mechanischer Belastung zu vermeiden, sind die Bauteile während des Transportes gegenüber Beschädigungen hinreichend zu schützen. Hierfür kann ein entsprechend zusätzlicher Kantenschutz für den Transport erforderlich sein (z.B. an Stellen der Transportsicherung).



Bild: 5: Hebeöse

## 5 | Allgemeines zu Entwurf, Bemessung und Konstruktion

### 5.1 | Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Die einschlägigen Normen und Regeln zur Bemessung, wie z.B. EN 1993-2 [21] und EN 1994-2 [22] gelten auch für feuerverzinkte Brückentragwerke – mit zwei Ausnahmen: Lediglich für die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für geschraubte, gleitfest-vorgespannte Verbindungen ergeben sich durch veränderte Reibbeiwerte Änderungen. Außerdem sind bei dem Nachweis gegen Werkstoffermüdung von EN 1993-1-9 [20] abweichende Kerbfälle zu berücksichtigen.

### 5.2 | Bemessung von Schraubverbindungen (GV-Verbindungen) für feuerverzinkte Bauteile

Für eine geschraubte Verbindung als Alternative zum geschweißten Stumpfstoß wird ein Laschenstoß empfohlen. Der Laschenstoß kann feuerverzinkt ausgeführt werden, ohne den Korrosionsschutz an den Stoßstellen der Stahlbauteile zu beschädigen oder teilweise zu entfernen. Dadurch entfällt die Notwendigkeit, die Beschichtung an der Stoßstelle mit einer Spritzmetallisierung oder organischen Beschichtung nachzubehandeln, wodurch die Dauerhaftigkeit des

Korrosionsschutzes von bis zu 100 Jahren beibehalten wird.

Für den Einsatz im Brückenbau sind geschraubte Passschrauben-Verbindungen oder gleitfest-vorgespannte Verbindungen erlaubt [4]. Nachteilig bei einer konventionellen Passschraubenverbindung ist der hohe Arbeitsaufwand durch Herstellen der Passverbindung. Daher ist die gleitfest-vorgespannte Verbindung in der Regel die wirtschaftlichere Lösung. Gleitfeste Verbindungen werden nach EN 1993-1-8 [30] in die Kategorien B und C unterteilt (Tabelle 3). Sie werden vorzugsweise in Konstruktionen, die eine kraftschlüssige und verformungsarme Bauteilverbindung fordern, sowie bei ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen angewendet.

Hierzu gehören hochfest-vorgespannte Schrauben. Je nach Kategorie darf im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit oder im Grenzzustand der Tragfähigkeit in der Regel der Bemessungswert des Gleitwiderstandes nicht überschritten werden. Der Bemessungswert der einwirkenden Abscherkraft im Grenzzustand der Tragfähigkeit darf den Bemessungswert der Schertragfähigkeit und des Lochleibungswiderstandes nicht überschreiten.

Für eine empfohlene, gleitfest-vorgespannte Schraubverbindung der Kategorie C sind nach EN 1993-1-8 [30] folgende Nachweise zu führen:

Tabelle 3: Kategorien von Schraubverbindungen [30]

Kategorie	Nachweiskriterium	Anmerkungen
<b>Scherverbindungen</b>		
A Scher-/Lochleibungsverbindung	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Keine Vorspannung erforderlich. Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9 dürfen verwendet werden.
B Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	$F_{v,Ed,scr} \leq F_{s,Rd,scr}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. Gleitwiderstand für Gebrauchstauglichkeit siehe 3.9.
C Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $\boxed{AC} \Sigma F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd} \boxed{AC}$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. Gleitwiderstand für Tragfähigkeit siehe 3.9. $N_{net,Rd}$ siehe 3.4.1(1)(c).
<b>Zugverbindungen</b>		
D Nicht vorgespannt	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Keine Vorspannung erforderlich. Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9 dürfen verwendet werden. $B_{p,Rd}$ siehe Tabelle 3.4.
E Vorgespannt	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. $B_{p,Rd}$ siehe Tabelle 3.4.
Der Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft $F_{t,Ed}$ sollte Beiträge aus Abstützkräften berücksichtigen, siehe 3.11. Schrauben unter Scher- und Zugbeanspruchung gelten in der Regel die Kriterien, die in Tabelle 3.4 angegeben sind.		

mit

Aufgrund von Krieeffekten durch die zusätzlich aufgebrachte Alkali-Silikat-Beschichtung kommt es mitunter zu einem Verlust der Vorspannkraft in den Schrauben, abhängig von Festigkeit und Dicke der Beschichtung. Eine verringerte Vorspannkraft sorgt jedoch für eine verringerte Möglichkeit der Kraftübertragung durch Reibung. Daher wird empfohlen, die Vorspannung der Schrauben nach einigen Tagen nochmals zu kontrollieren bzw. neu einzustellen. Ein großer Teil der Vorspannkraftverluste ist innerhalb der ersten Minuten nach dem ersten Anziehen zu beobachten. Durch wiederholtes Anziehen der Schrauben ist die Ausgangsvorspannkraft wiederherstellbar.

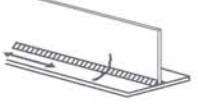
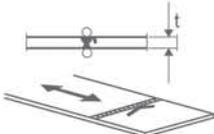
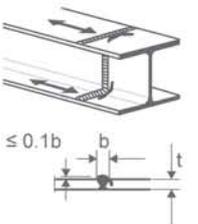
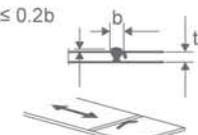
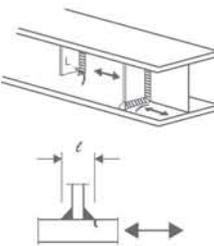
### 5.3 | Nachweise der Ermüdungsfestigkeit

Zusätzlich zur statischen Bemessung sind die Regeln der DIN EN 1993-2 [21], DIN EN 1993-1-9 [20] und DIN EN 1994-2 [22] für die erforderlichen Nachweise gegen Werkstoffermüdung anzuwenden.

Der Ermüdungsnachweis erfolgt, indem die Beanspruchungen mit den Beanspruchbarkeiten verglichen werden. Zur Ermittlung der Beanspruchbarkeiten werden in der EN 1993-1-9 [20] Ermüdungsfestigkeitskurven (Wöhlerlinien) für Standardkerbfälle auf Basis von Nennspannungen herangezogen. Diese ergeben sich aus der Auswertung von Ergebnissen von Ermüdungsversuchen [3] [34] an bauteilähnlichen Prüfkörpern (Kerbdetails) mit geometrischen und strukturellen Imperfektionen, die von der Stahlproduktion und Bauteilherstellung herrühren (z. B. Herstellungstoleranzen und Eigenspannungen infolge Schweißens) [5]. Verzinkte Bauteile sind nicht explizit durch die Norm abgedeckt.

Auf Basis neuer Versuche an Kerbdetails in stückverzinkter Ausführung konnte die Kerbfalltabelle der Norm ergänzt werden [3] [35]. Zur Ermittlung der Beanspruchbarkeiten von feuerverzinkten Bauteilen ist Tabelle 4 heranzuziehen. Sollten auf Ermüdung beanspruchte Bauteile im Tragwerk vorkommen, die nicht daraus abzuleiten sind, ist es erforderlich, zu deren Nachweis gesonderte Überprüfungen durchzuführen, genauere Nachweisverfahren zu wählen bzw. Beobachtungsszenarien festzulegen.

Tabelle 4: Kerbfälle für feuerverzinkte Details [3] [35]

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
140	 <p>ANMERKUNG: Der Kerbfall 140 ist somit der höchstmögliche für feuerverzinkte Bauteile.</p>	Bleche und Flachstähle mit gewalzten/gefrästen Kanten	Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.
112		Maschinell brenn- oder wasserstrahlgeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennriefen Maschinell brenn- oder wasserstrahlgeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.	Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$ ) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen Keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut
100		Handgeschweißte Kehlnähte	Zwischen Flansch und Stegblech ist eine sehr gute Passgenauigkeit erforderlich.
80		Über eine durchgeschweißte Quernaht geführte durchgehende Längsnaht als Halskehlnaht	
100		Blechdickenabhängigkeit für $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	Querstöße in Blechen und Flachstählen. <ul style="list-style-type: none"> <li>Alle Nähte blecheben in Lastrichtung geschliffen.</li> <li>Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.</li> <li>Beidseitige Schweißung mit ZFP.</li> </ul>
80	 <p><math>\leq 0.1b</math></p>	Blechdickenabhängigkeit für $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	Vollstöße von Walzprofilen mit Stumpfnähten ohne Freischnitte. <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Nahtüberhöhung muss <math>\leq 10</math> % der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden.</li> <li>Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.</li> <li>Beidseitige Schweißung mit ZFP.</li> </ul>
80	 <p><math>\leq 0.2b</math></p>	Blechdickenabhängigkeit für $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	Querstöße in Blechen, Flachstählen, Walzprofilen oder geschweißten Blechträgern. <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Nahtüberhöhung muss <math>\leq 20</math> % der Nahtbreite und mit verlaufendem Übergang in die Blechoberfläche ausgeführt werden.</li> <li>Keine Schweißnahtnachbehandlung</li> <li>Schweißnahtan- und -auslaufstücke sind zu verwenden und anschließend zu entfernen, Blechränder sind blecheben in Lastrichtung zu schleifen.</li> <li>Beidseitige Schweißung mit ZFP.</li> </ul>
80		$l \leq 50$ mm	Vertikalsteifen in Walz- oder geschweißten Blechträgern. <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schweißnahtenden sind sorgfältig zu schleifen, um Einbrandkerben zu entfernen.</li> <li>Wenn die Steife, siehe Skizze links, im Stegblech abschließt, wird <math>\Delta\sigma</math> mit den Hauptspannungen berechnet.</li> </ul>
80 (m=8)		Schweißnähte unter Querkraftbeanspruchung: Kopfbolzendübel in Verbundwirkung	$\Delta\tau$ wird am Nennquerschnitt des Dübels ermittelt.

Es ist zu bemerken, dass die Herabstufung der Ermüdungsfestigkeit von feuerverzinkten, schwachgekerbten Bauteilen um bis zu einen Kerbfall im Vergleich zu unverzinkten Bauteilen für die Wirtschaftlichkeit der Bemessung als unkritisch einzustufen ist. Für eine Wirtschaftswegbrücke mit einer geringen Verkehrsbelastung und einer mittleren Spannweite spielt beispielsweise der Ermüdungsnachweis für die Bemessungen eine untergeordnete Rolle. Diese Herabstufung führt daher auch in der Regel zu keinen größeren Querschnittsabmessungen (vgl. Kapitel 9).

## 6 | Detailausbildung für verzinkte Stahl- und Verbundbrücken

### 6.1 | Allgemeines

Grundsätzlich führt die Ausbildung einfacher und schlichter Details zu nachhaltigen und dauerhaften Konstruktionen. Neben der gestalterischen Ausbildung der Details sollten diese auch Oberflächen mit stehendem Wasser und Schmutzansammlungen vermeiden, witterungsbeständige Oberflächen vorsehen und die Möglichkeiten von Reparatur und Wartung z.B. des Korrosionsschutzes ermöglichen.

Für häufig vorkommende Konstruktionsdetails des Straßenbrückenbaus wurden auf Basis von Erfahrungswerten Richtzeichnungen für die einzelnen Detailausbildungen erarbeitet und als „Richtzeichnungen für Brücken und andere Ingenieurbauwerke“ in Verbindung mit der anzuwendenden ZTV-ING [5] herausgegeben. Es wird empfohlen diese anzuwenden, um die Dauerhaftigkeit der Brücken zu gewährleisten.

Die verwendeten Materialien und deren Schutz sind mit den auf sie einwirkenden klimatischen Belastungen (Regen, Schnee, Frost, usw.) sowie den chemischen Belastungen (Chloride und Sulfate) abzustimmen. So sind eine ausreichende Betonüberdeckung und die richtige Betonzusammensetzung für die Fahrbahnplatte zu wählen, um den Chlorideintrag und Karbonatisierung zu vermeiden bzw. zu begrenzen.

Zusätzlich ist ein gutes Abdichtungssystem der Fahrbahnplatte in Verbindung mit einer funktionierenden Entwässerung für die Dauerhaftigkeit der sich unter der Fahrbahnplatte befindenden Elemente entscheidend. Tausalzhaltiges Wasser unter der Dichtung der Fahrbahn-

platte ist zu vermeiden. Hierbei ist zu beachten, dass der Fahrbahnaufbau selbst für eine Straßenbrücke in Zementbetonbauweise eine Lebensdauer von 25 Jahren und einer Straßenbrücke mit Asphaltbeton- oder Gussasphaltbauweise 15 Jahre betragen sollte.

Unterhaltungsfreundlichkeit ist die Grundlage zur Garantie der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und vor allem der Dauerhaftigkeit über die Lebensdauer eines Brückenbauwerks. Hierzu ist eine kontinuierliche Wartung und Instandhaltung zu verfolgen, welche durch die Zugänglichkeit bzw. Inspizierbarkeit der Konstruktionsdetails zu ermöglichen ist. Der Effekt einer Maßnahme auf den Betrieb ist hierfür schon in der Entwurfsphase abzuschätzen.

Kappen und Verschleißteile, wie Lager und Fahrbahnübergangskonstruktionen, müssen z.B. unabhängig von der Tragkonstruktion auswechselbar sein. Sie weisen in der Regel eine Lebensdauer von 30 bis 40 Jahren auf.

### 6.2 | Allgemeine Hinweise zur beanspruchungsrelevanten Detailausbildung für die Verzinkung

Die DASt-Richtlinie 022 [25] enthält neben den in Kapitel 4.4.2 spezifizierten Vorgaben für Werkstoffe und Profile eine Einstufung von Konstruktionsdetails in verschiedene Detailklassen (A, B, C), die den steigenden Einfluss der konstruktiven Kerbwirkung auf die während des Verzinkungsprozesses auftretenden Beanspruchungen widerspiegeln. Bei der Detailausbildung sollten günstige Varianten der Klasse A oder B verwendet werden. Weiterhin werden Vorgaben für längere Tauchzeiten bei Erzeugnisdicken  $> 30$  mm gemacht.

Für allgemeine Hinweise zur Ausbildung von Details wird auf Kapitel 4.4.2 verwiesen.

### 6.3 | Standarddetails von Verbundbrücken mit kleinen und mittleren Spannweiten

Verbundbrücken mit kleinen und mittleren Spannweiten zeichnen sich durch eine einfache Ausbildung der Details aus und sind deshalb für das Feuerverzinken gut geeignet. Zur Abtragung der Horizontallasten und zur Stabilisierung werden die Längsträger über den Auflagern durch Querträger ausgesteift. Bei Durchlaufträgern ist in den Bereichen negativer Stützenmomente Biegedrillknicken der druckbeanspruchten Untergurte durch den Entwurf entsprechender Auflagerquerträger und, bei Erfordernis, von weiteren Querträgern im Feld zu verhindern.

Als Querträger über den Lagern sind folgende Varianten üblich:

- Querträger aus Stahl, die mit den Längsträgern durch Schrauben oder Schweißen verbunden werden, siehe Kapitel 6.3.1.
- Querträger aus Stahlbeton, wobei die Bewehrungsstäbe durch Steglöcher der Längsträger geführt werden. Diese können mit direkter oder indirekter Lagerung der Hauptträger ausgeführt werden, siehe Kapitel 6.3.2 und Kapitel 6.3.3.

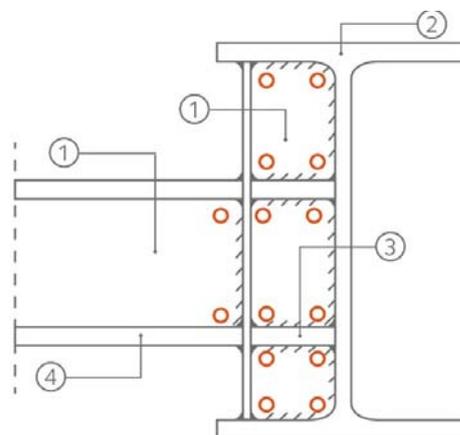


Zur horizontalen Aussteifung im Feld werden in der Regel Stahlquerträger vorgesehen. Dabei wird zwischen durch Schraubverbindungen und durch geschweißte Verbindungen mit den Längsträgern verbundenen Querträgern unterschieden, siehe Kapitel 6.3.4.

#### 6.3.1 | Stahlquerträger über Endauflagern und Mittelstützen

##### 6.3.1.1 | Geschweißter Anschluss eines I-Querträgers am Auflager

Als angeschweißte Stahlquerträger werden in der Regel I-Profile (für gewalzte Profile typischerweise IPE oder HE) verwendet. Eine übliche Detailausbildung ist es, den Stahlquerträger mittels einer Stumpfnah mit einer in die Profilkammer geschweißten T-Rippe am Hauptträger zu verschweißen, siehe Bild 6. Die T-Rippe kann aus einem HE-Profil geschnitten und an die Abmessungen des Haupt- und Querträgers angepasst werden. Häufig wird die T-Rippe auch aus in die Kammer geschweißten Blechen zusammengesetzt.



Durchmesser der Bohrung:  $d \geq 1.5 \times t_{\text{steg}}$   
 $\geq 15 \text{ mm}$

1 =  $t_{\text{steg}}$ , 2 = Hauptträger, 3 = Steife, 4 = Querträger

Bild 6: Detailausführung eines an eine T-Rippe angeschweißten I-Querträgers; links: Praxisbeispiel Fertigung; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen

Alternativ kann der Querträger auch direkt an den Hauptträger angeschweißt werden, siehe Bild 7.

Für eine verzinkungsgerechte Gestaltung sind in den Anschlussbereichen des Querträgers an den Längsträger Durchflussöffnungen erforderlich (Bild 6 und Bild 7, jeweils rechts). Bei Verwendung einer T-Rippe sind im Rippensteg jeweils zwei Öffnungen in den unteren und oberen Ecken einer jeden Kammer vorzusehen. Bei beiden Varianten ist in jeder der vier Ecken des Querträgerstegs eine Öffnung vorzusehen.

Die Öffnungen können rund oder als viertelkreisförmige Freischnitte ausgeführt werden. Als Richtwert für die Größe des erforderlichen Öffnungsdurchmessers kann  $d \geq 1,5 \times t_{\text{Steg}}$  (mindestens jedoch 15 mm) bei Rund- bzw. des erforderlichen Radius  $R \geq t_{\text{Steg}} + 3 \times a$  (= Schweißnahtdicke) (mindestens jedoch 25 mm) bei Viertelkreisöffnungen angenommen werden.

Mit dem Verzinkungsbetrieb sind die Details im Einzelfall abzustimmen, insbesondere auch die Verwendung von Bohrungen als Anschlagpunkte für den Verzinkungsprozess.

Die Konstruktionsdetails sind gemäß DAST-Richtlinie 022 [25], Tabelle 4 wie folgt einzustufen:

- Eingeschweißte T-Rippe: Detail 6 der Detailklasse A (die Öffnungen im Rippensteg führen zu keiner nennenswerten Beanspruchung und können vernachlässigt werden)
- Querträger mit Kopfplatte und Durchflussöffnungen im Steg: Detail 1a der Detailklasse B

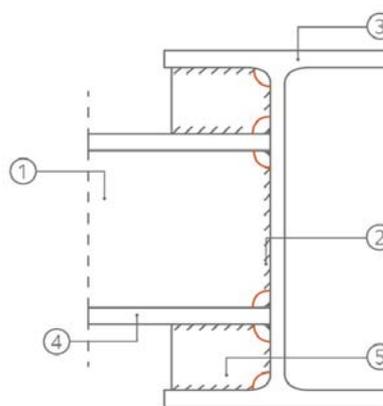


Bei beiden Varianten eines geschweißten Querträgeranschlusses ist zu beachten, dass die Breite der durch die Querträger gruppierten Längsträger nicht die Breite der Verzinkungsbäder überschreitet. Von einer prinzipiell möglichen Verzinkung der um 90° gedrehten Verbaugruppe mit dann liegenden Längsträgern wird abgeraten, da die Qualität der Verzinkung negativ beeinflusst wird.

Falls die gemeinsame Verzinkung der gruppierten Längsträger nicht möglich ist, wird von einem nachträglichen Einschweißen der Querträger in die Kammern der verzinkten Längsträger abgeraten. Hierfür wird eine geschraubte Variante empfohlen (Kap. 6.3.1.2). Sollen die Querträger dennoch eingeschweißt werden, so sind zunächst Trägerstummel vor dem Verzinken an die Hauptträger anzuschweißen. An diese werden nach dem Verzinken die Querträger mittels Stumpfstoßen angeschweißt. Das Verschweißen und nachträgliche Aufbringen des Korrosionsschutzes hat nach Kapitel 3.4 bzw. 7.2 zu erfolgen.

### 6.3.1.2 | Geschraubter Anschluss eines I-Querträgers am Auflager

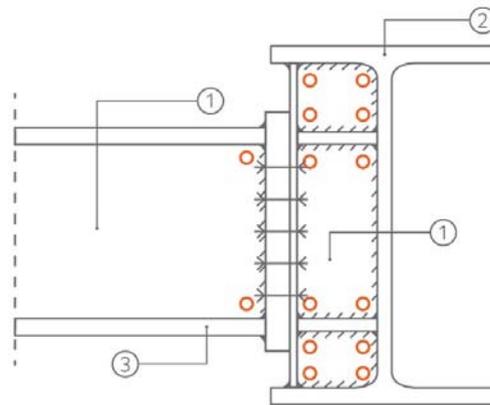
Alternativ zu einem geschweißten Anschluss kann ein geschraubter Anschluss der I-Querträger im Auflagerbereich ausgeführt werden. An eine analog zu Kapitel 6.3.1.1 eingeschweißte T-Rippe am Hauptträger wird der Querträger mittels einer Kopfplatte angeschlossen, siehe Bild 8.



Radius Ausnehmung:  $R \geq t_{\text{steg}} + 3 \times a$  bzw.  $t_{\text{steg}} + 3 \times a \geq 25 \text{ mm}$

1 =  $t_{\text{steg}}$ , 2 =  $a$  (=Schweißnahtdicke), 3 = Hauptträger, 4 = Querträger, 5 =  $t_{\text{steg}}$

Bild 7: Vormontiertes Trägerpaar mit an die Hauptträger angeschweißtem Querträger; links: Praxisbeispiel Transport; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen



Durchmesser der Bohrung:  $d \geq 1,5 \times t_{\text{steg}}$   
 $\geq 15 \text{ mm}$

1 =  $t_{\text{steg}}$ , 2 = Hauptträger, 3 = Querträger

Bild 8: Detailausführung einer T-Rippe für den geschraubten Anschluss des I-Querträgers; links: Praxisbeispiel Montage; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen

Eine weitere Möglichkeit ist es, den I-Querträger an ein an den Hauptträger geschweißtes Querträgerende mit verschraubten Laschen zu stoßen, siehe Bild 9.

Der Anschluss des Querträgerendes an den Hauptträger erfolgt durch eine Stumpfnah an den Hauptträgersteg. Zur Kraftübertragung und Aussteifung ist die Kammer mit Blechen über das gesamte Kammermaß auszusteiern.

Für eine verzinkungsgerechte Gestaltung sind in den Anschlussbereichen des Querträgers an den Längsträger Durchflussöffnungen erforderlich. Bei Verwendung einer T-Rippe sind im Rippensteg jeweils zwei Öffnungen in den unteren und oberen Ecken einer jeden Kammer vorzusehen. Auf Seiten des Querträgers ist in jeder Ecke (oben und unten) hinter der Kopfplatte eine Durchflussöffnung vorzusehen.

Bei einem Laschenanschluss ist in den beiden Ecken des an den Längsträgers angeschweißten Trägerstummels jeweils eine Öffnung vorzusehen. Auf Seiten des Querträgers sind keine zusätzlichen Öffnungen erforderlich.

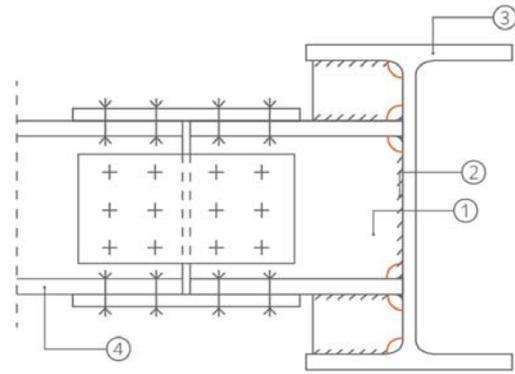
Die Öffnungen können rund oder als viertelkreisförmige Freischnitte ausgeführt werden. Als Richtwert für die

Größe des erforderlichen Öffnungsdurchmessers kann  $d \geq 1,5 \times t_{\text{Steg}}$  (mindestens jedoch 15 mm) bei Rundlöchern bzw. des erforderlichen Radius  $R \geq t_{\text{Steg}} + 3 \times a$  (= Schweißnahtdicke) (mindestens jedoch 25 mm) bei Viertelkreisöffnungen angenommen werden.

Mit dem Verzinkungsbetrieb sind die Details im Einzelfall abzustimmen, insbesondere auch die Verwendung von Bohrungen als Anschlagpunkte für den Verzinkungsprozess.

Die Konstruktionsdetails sind gemäß DAST-Richtlinie 022 [25], Tabelle 4 wie folgt einzustufen:

- Eingeschweißte T-Rippe: Detail 6 der Detailklasse A (die Öffnungen im Rippensteg und –flansch führen zu keiner nennenswerten Beanspruchung und können vernachlässigt werden)
- Querträger mit Kopfplatte und Durchflussöffnungen im Steg: Detail 1a der Detailklasse B
- Querträger mit Bohrungen im Steg mit  $d \geq 25 \text{ mm}$ : Detail 3 der Detailklasse A
- Querträger mit Bohrungen im Steg mit  $d < 25 \text{ mm}$ : Detail 2 der Detailklasse B



Radius Ausnehmung:  $R \geq t_{\text{Steg}} + 3 \times a$   
 $\geq 25 \text{ mm}$

1 =  $t_{\text{Steg}}$ , 2 = a (=Schweißnahtdicke),  
 3 = Hauptträger, 4 = Querträger

Bild 9: Detailausführung des Laschenanschlusses eines I-Querträgers; links: Praxisbeispiel eingebauter Zustand; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen

### 6.3.2 | Betonquerträger über dem Endauflager

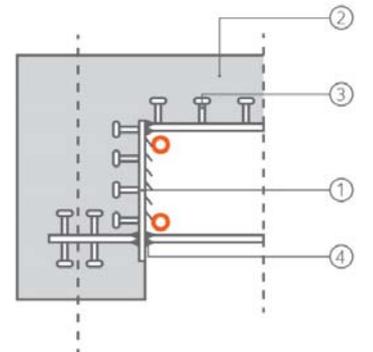
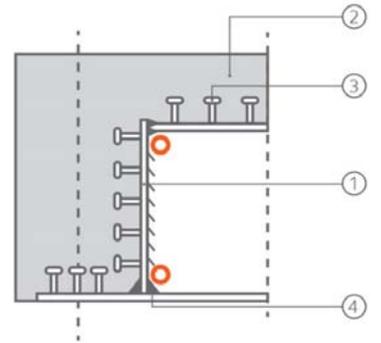
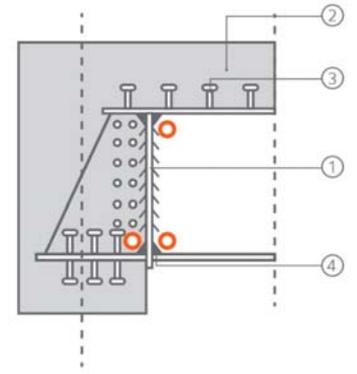
Betonquerträger sind Brückenelemente, die die Ausbildung einer Einspannung der Träger an den Endauflagern durch eine Ortbetoneinfassung gewährleisten. Außerdem haben die Betonquerträger den Vorteil, die Hauptträger monolithisch in Querrichtung zu verbinden und somit ihren Widerstand gegen Torsion und Verwölbung zu erhöhen. Deshalb sind Querträger im Feld bei Fahrbahnplatten mit geringen Abständen zwischen den Hauptträgern in der Regel nur im Montagezustand für die Stabilisierung der Hauptträger erforderlich und können nach dem Abbinden des Betons ausgebaut werden.

Typische Ausbildungen von Betonquerträgern für die Endauflager sind in Abbildung 6.5 dargestellt.

Für eine verzinkungsgerechte Gestaltung des Hauptträgers ist hinter der Kopfplatte jeweils eine Durchflussöffnung in der oberen und unteren Ecke vorzusehen. Als Richtwert für die Größe des erforderlichen Öffnungsdurchmessers kann  $d \geq 1,5 \times t_{\text{Steg}}$  (mindestens jedoch 15 mm) bei Rundlöchern angenommen werden.

Das Konstruktionsdetail ist gemäß DAST-Richtlinie 022 [25], Tabelle 4 wie folgt einzustufen:

- Hauptträger mit Kopfplatte und Durchflussöffnungen im Steg: Detail 1a der Detailklasse B



Durchmesser der Bohrung:  $d \geq 1.5 \times t_{\text{steg}}$   
 $\geq 15 \text{ mm}$

- 1 = Hauptträger, 2 = Betonplatte,
- 3 = Kopfbolzendübel,
- 4 = Schweißnaht

Bild 10: Detailausführung Betonquerträger als Endauflager; links und mitte: Praxisbeispiele Fertigung, Montage, eingebauter Zustand; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen

### 6.3.3 | Betonquerträger über Mittelstützen

Bei Mehrfeldbrücken können Querträger aus Stahlbeton auch über den Mittelstützen angeordnet werden. Vorteil der Betonquerträger im Vergleich zu Stahlquerträgern ist, dass sie, in Verbindung mit einer entsprechenden Detailausbildung, gleichzeitig als Stoß der Längsträger dienen und somit erforderliche Stöße infolge Längenbegrenzungen durch das Zinkbad bzw. der Lieferung kompensieren können. So können klassische Lösungen, wie ein geschraubter oder geschweißter Hauptträgerstoß, durch einen Betonquerträger ersetzt werden. Stoßarbeiten, welche auf der Baustelle ausgeführt werden müssen und die sich besonders auf kleinen Baustellen häufig nur umständlich durchführen lassen, können so durch Planung von Stahlbetonquerträger über den Stützen merklich reduziert werden. Diese Ausführungsart entspricht derjenigen für vorgespannte Brücken mit sofortigem Verbund, wobei die Träger aus Stahl und Betonfertigteilen sind.

Der Querträger besteht aus einem Stahlbetonbalken mit rechteckigem Querschnitt mit einer Breite von 90 bis 150 cm und einer gleichen oder größeren Höhe als die Hauptträger (siehe Bild 14). Die biegesteifen Stöße werden durch Stirnplatten (Bild 12 und Bild 13) und gezieltes Bewehren der Querträger und der Fahrbahnplatte (Bild 11) vorbereitet. Das Gesamtsystem in

Brückenlängsrichtung wirkt während des Betonierens (Eigenlasten aus Längsträger, Schalung, Frischbeton) als Einfeldträger. Mit dem Abbinden des Betons entsteht der biegesteife Stoß, sodass das System Stützmomente ausschließlich durch die Verkehrs- und Ausbaulasten erzeugt. Dabei werden folgende Vorteile kombiniert:

- Die Längsträger werden als Einfeldträger montiert und durch eine Ortbetonergänzung gestoßen:
  - o Die Spannweiten können so sukzessiv gebaut werden. Dies hilft, die Verkehrsbeeinträchtigung durch die Brückenbaustelle und damit auch negative volkswirtschaftliche Auswirkungen zu minimieren.
  - o Durch Planung des Bauablaufs kann entweder die Durchbiegung der Längsträger in der Bauphase oder die Spannungsbeanspruchung des Betonquerträgeranschlusses beeinflusst werden: wird zuerst der Betonquerträger gefertigt, sind die Stahlträger während des Betonierens der Fahrbahnplatte im Feld bereits eingespannt und die Durchbiegung infolge Frischbetoneigen-gewicht wird um 80 % reduziert. Erfolgt ein zeitgleiches Betonieren der Querträger mit der Fahrbahnplatte ist zwar die durch eine werk-seitige Überhöhung der Hauptträger zu

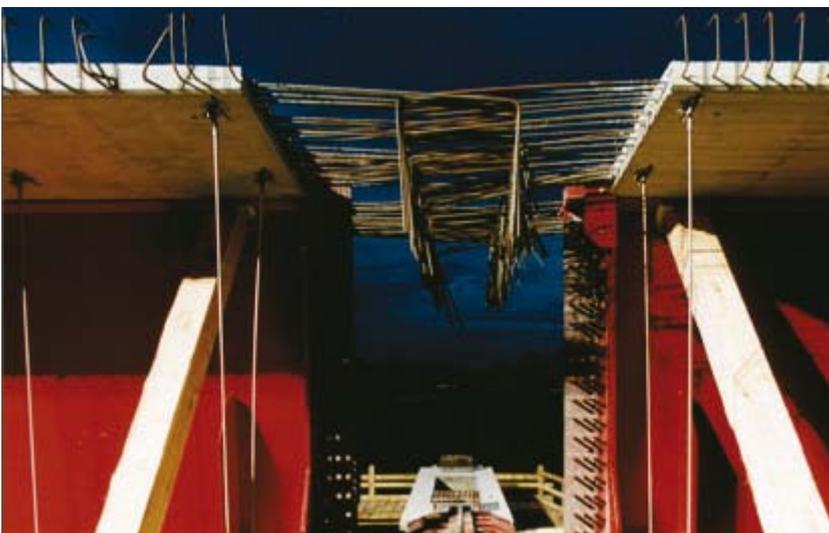


Bild 11: Praxisbeispiel: Vorbereitung für den Betonquerträger über dem Mittelaufleger – Talbrücke Oberhartmannsreuth



Bild 12: Detail mit angeschweißter Stirnplatte



Bild 13: Detail mit am Unterflansch angeschweißter Druckverteilungsplatte

kompensierende Durchbiegung höher, allerdings sind die Spannungsnachweise des Betonquerträgeranschlusses und der Rissbreitennachweis über der Stütze nur für die Ausbaulasten und Verkehrslasten zu führen. Ein Vouten der Stahlträger am Auflager kann so in der Regel entfallen.

- Die bei begrenzten Fertigungs- bzw. Lieferlängen erforderlichen Vollstöße (geschraubt oder geschweißt) können an den Betonquerträger gelegt werden:
  - o Die Stoßarbeiten auf der Baustelle können reduziert werden. Zudem ist ein homogener Aufbau des Korrosionsschutzes bei kurzen Spannweiten der Hauptträger durch Verzinken ohne Störung an der Stoßstelle möglich.
  - o Die auf der Baustelle einzuhaltenden Toleranzen sind durch die Verbindung mittels Ortbeton gegenüber einem stahlbaummäßigen Anschluss günstiger.
  - o Auf der Baustelle ist kein Stahlbaugewerk mit Spezialwissen mehr erforderlich. Die Anarbeitung kann unter Werksbedingungen kostenoptimiert und mit hoher Qualität erfolgen. Die Interaktion von Gewerken auf der Baustelle und Baustelleneinrichtung wird durch Just-in-time-Anlieferung der einbaufertigen Träger optimiert.

Die statische Funktionsweise des Betonquerträgers ist recht einfach zusammenzufassen. Das negative Biegemoment über der Stütze wird in ein Kräftepaar, bestehend aus einer Druckkraft und aus einer Zugkraft zerlegt. Die Druckkraft wird über Kontakt (entweder über direkten Kontakt von Untergurt gegen Untergurt mittels Druckplatten oder über indirekten Kontakt durch den Beton im Falle eines Stirnplattenanschlusses) übertragen. Die Stirnplatten werden mittels durchgeschweißten Schweißnähten auf dem Träger bzw. den Unterflansch aufgeschweißt.

Die Zugkraft wird vollständig von der Bewehrung übertragen. Die Kopfbolzendübel auf den oberen Flanschen übertragen die Biegezugkräfte in die Fahrbahnplatte sowie deren Längsbewehrung und leiten so die Zugkräfte über den Querträger hinweg weiter. Hierzu ist Bewehrung über der Stütze zuzulegen und im Feld zu verankern. Die Querkraft wird entweder über die an den Trägersteg (Anschluss mit Druckplatten) oder an die Stirnplatte (Stirnplattenanschluss) geschweißte Dübel in den Betonquerträger eingeleitet.

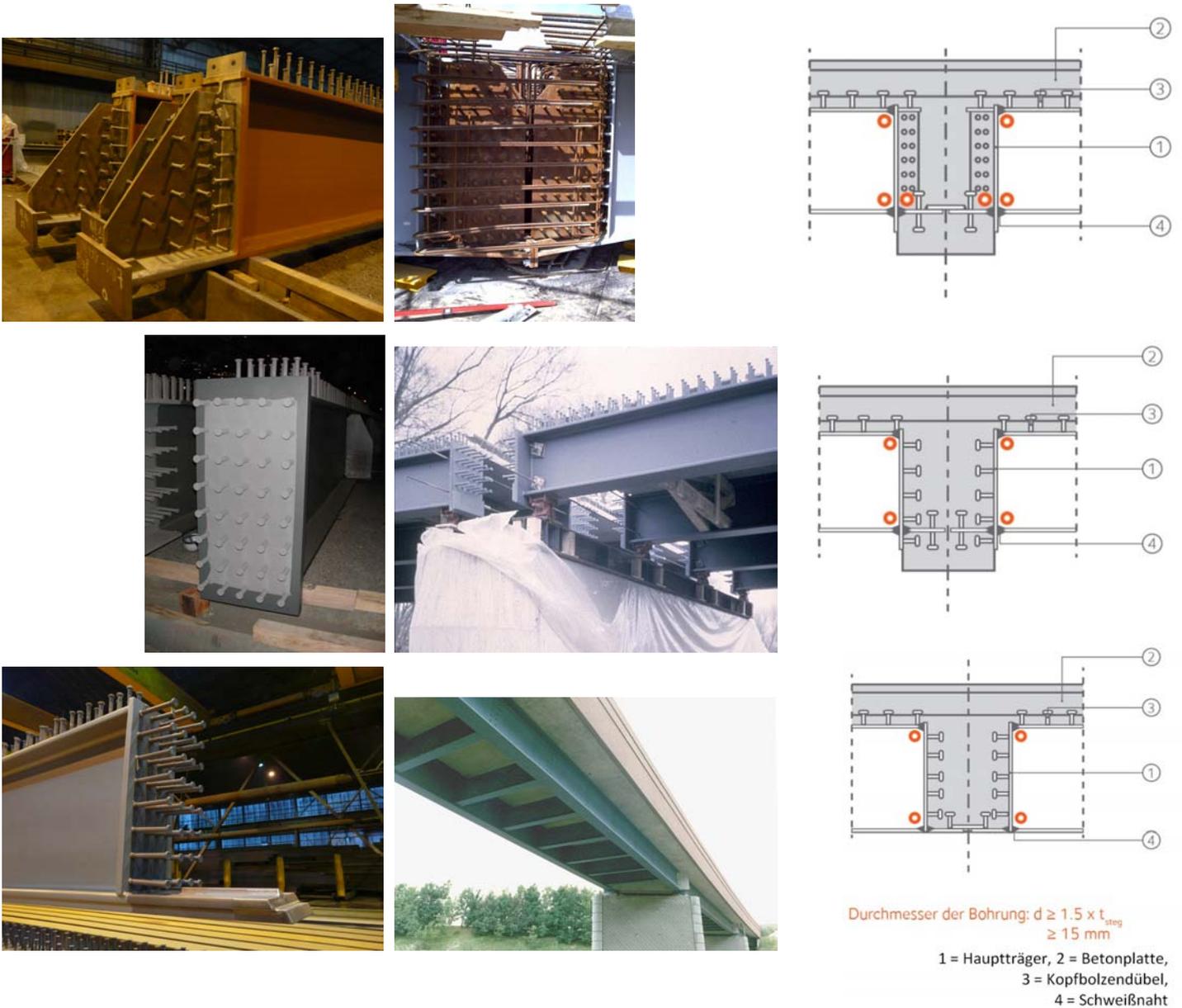


Bild 14: Detailausführung Betonquerträger als Mittelaufleger; links und mitte: Praxisbeispiele Fertigung, Montage, eingebauter Zustand; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen

Ähnliche Details werden auch für die Ausführung der Endauflager von Brücken mit integralen Widerlagern entworfen. Die Konzeptionierung erfolgt somit analog. Für die verzinkungsgerechte Ausführung gelten die gleichen Hinweise und Empfehlungen wie in Kapitel 6.3.2.

### 6.3.4 | Stahlquerträger im Feld

#### 6.3.4.1 | Allgemeines

Die wirtschaftlichste Option der Querverteilung der Lasten erfolgt ausschließlich über die Betonfahrbahnplatte. Querträger dienen demzufolge nur zur Stabilisierung der Längsträger während der Bauphasen (Sicherung der

Träger gegen Kippen in den Bereichen positiver Momente). Nach dem Abbinden des Betons übernimmt die Fahrbahnplatte diese Funktion, sodass die Querträger ausgebaut werden können. Bei Durchlaufträgern ist in den Bereichen negativer Stützmomente Biegedrillknicken der druckbeanspruchten Untergurte durch den Entwurf entsprechender Auflagerquerträger und, bei Erfordernis, von weiteren Querträgern im Feld zu verhindern.

Mögliche Detailgestaltungen für Querträger im Feld werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt. Es existieren geschraubte sowie geschweißte Details.

### 6.3.4.2 | Geschraubter Anschluss eines I-Querträgers mit T-Rippe im Feld

Eine Variante der geschraubten Detailausbildung für den Anschluss von Stahlquerträgern im Feld ist analog des T-Rippenanschlusses als Endquerträger (Bild 8, siehe Kapitel 6.3.1.2). I-Querträgerprofile werden in der Regel aus den Profilvereinen IPE oder HE gewählt. Bei entsprechender Ausführung kann der Anschluss als biegesteif klassifiziert werden.

Für die verzinkungsgerechte Ausführung gelten die gleichen Hinweise und Empfehlungen wie in Kapitel 6.3.1.2.



Bild 15: Detailausführung geschraubter Anschluss eines I-Querträgers an eine an den Hauptträger geschweißte T-Rippe; Praxisbeispiel Bauzustand

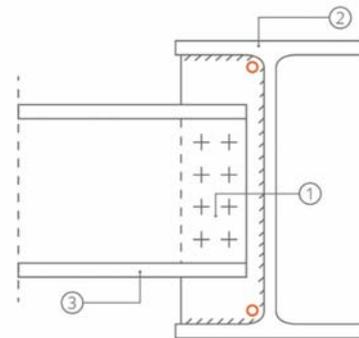


Bild 16: Detailausführung geschraubter Anschluss eines U-Querträgers mit Aussteifungsblech verschraubt; links: Praxisbeispiel Bauzustand; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen

### 6.3.4.3 | Geschraubter Anschluss eines I- oder U-Querträgers mit Aussteifungsblech im Feld

Sofern nur die Querkraftverteilung durch die Querträger und kein planmäßig biegesteifer Anschluss für den Bauzustand zu gewährleisten ist, kann ein I- (IPE oder HE) oder U-Querträgersteg (UPN) mit einem in die Kammer des Hauptträgers eingeschweißten Aussteifungsblech des Hauptträgers verschraubt werden (Bild 16). Die Abmessungen des Aussteifungsblechs werden an diejenigen des Hauptträgers angepasst. So wird eine Reduzierung der Anarbeitungskosten und eine Verbesserung des Kerbdetails am Unterflansch im Vergleich zu einer eingeschweißten T-Steife erzielt. Zusätzlich ist die Montage im Vergleich zu einem durch Kopfplatten an eine T-Rippe verschraubten Querträger vereinfacht.

Für die verzinkungsgerechte Ausführung gelten die gleichen Hinweise und Empfehlungen wie in Kapitel 6.3.1.2.



Durchmesser der Bohrung:  $d \geq 1,5 \times t_{\text{steig}}$   
 $\geq 15 \text{ mm}$

1 =  $t_{\text{steig}}$ , 2 = Hauptträger, 3 = Querträger

#### 6.3.4.4 | Geschweißter Anschluss eines I- oder U-Querträgers an Aussteifungsblech im Feld

Das Detail eines an ein Aussteifungsblech angeschlossenen I- oder U-Querträgers, siehe Kapitel 6.3.4.3, kann auch geschweißt ausgeführt werden (Bild 17). Bei der Wahl einer Stegverstärkung kann eine Teileinspannung der Querträger durch den geschweißten Anschluss realisiert werden. Eine verschweißte Ausführung ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn Trägerpaare in Gesamt- oder Teillänge gemeinsam verzinkt werden. Hierbei ist die Einschränkung der Elementbreite durch die Verzinkungsbäder zu beachten. Von einer prinzipiell möglichen Verzinkung der um 90° gedrehten Verbaugruppe mit dann liegenden Längsträgern wird auch bei dieser Variante abgeraten, da die Qualität der Verzinkung negativ beeinflusst wird. Ebenso wird von einem nach der Verzinkung eingeschweißtem Querträger mit nachträglich aufgebautem Korrosionsschutz abgeraten.

Für eine verzinkungsgerechte Gestaltung sind in den Ecken der Anschlussbleche zum Längsträgersteg hin Durchflussöffnungen erforderlich, die als runde Bohrungen oder viertelkreisförmige Freischnitte ausgeführt werden können. Als Richtwert für die Größe

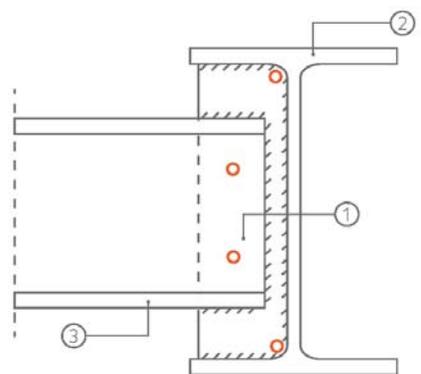


des erforderlichen Öffnungsdurchmessers kann  $d \geq 1,5 \times t_{\text{Steg}}$  (mindestens jedoch 15 mm) bei Rundlöchern bzw. des erforderlichen Radius  $R \geq t_{\text{Steg}} + 3 \times a$  (= Schweißnahtdicke) (mindestens jedoch 25 mm) bei Viertelkreisöffnungen angenommen werden. Um in den Überlappungsbereichen des Querträgers zum Anschlussblech eine Ansammlung von Feuchtigkeit zu vermeiden, die dann während der Verzinkungsprozesses durch Verdampfung zum Aufbau eines Druckzustandes führen kann, sind in den Querträgersteg Entlastungsbohrungen mit  $d \geq 12$  mm alle 300 mm vorzusehen.

Mit dem Verzinkungsbetrieb sind die Details im Einzelfall abzustimmen, insbesondere auch die Verwendung von Bohrungen als Anschlagpunkte für den Verzinkungsprozess.

Die Konstruktionsdetails sind gemäß DAST-Richtlinie 022 [25], Tabelle 4 wie folgt einzustufen:

- Eingeschweißte Rippe: Detail 5 der Detailklasse A (die Öffnungen im Rippensteg führen zu keiner nennenswerten Beanspruchung und können vernachlässigt werden)
- Umschweißung Anschlussblech an Querträgerflansch: Detail 3 der Detailklasse B



Durchmesser der Bohrung:  $d \geq 1,5 \times t_{\text{Steg}}$   
 $\geq 15$  mm

1 =  $t_{\text{Steg}}$ , 2 = Hauptträger, 3 = Querträger

Bild 17: Detailausführung geschweißter U-Querträgeranschluss an Aussteifungsblechen inklusive Stegverstärkung des Hauptträgers; links: Praxisbeispiel Fertigung; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen

### 6.3.4.5 | Direkter Schraubanschluss eines I-Querträgers an den Hauptträgersteg

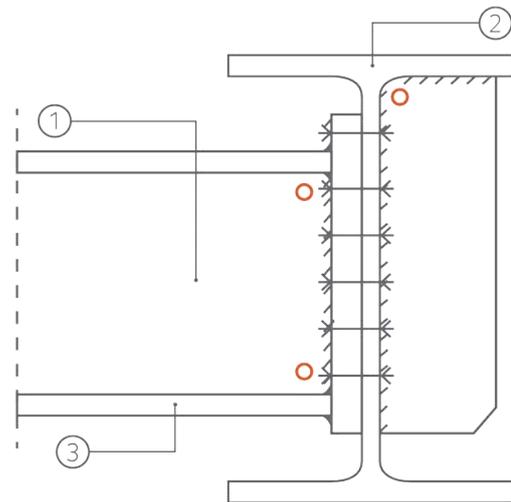
Alternativ kann der I-Querträger über eine Stirnplatte mit dem Hauptträgersteg direkt verschraubt werden (Bild 18). Dieses für Brücken aus Walzträgern in Beton (WiB) typische Anschlussdetail kann auf Verbundbrücken für nicht durchlaufende Querträger bzw. Randträger übertragen werden. Vorteil ist der geringe Anarbeitungsaufwand und dass der Anschluss die Ermüdungskategorie des Unterflansches nicht beeinträchtigt. Bei vormontierten Trägerpaaren kann dieses Detail sinnvoll eingesetzt werden. Sollten die Querträger erst nach dem Einheben der Hauptträger montiert werden, sind diese einzuschwenken, wobei eine Beschädigung des Korrosionsschutzes auszuschließen ist.

Für eine verzinkungsgerechte Gestaltung sind in den Ecken des Querträgersteges zur Kopfplatte hin Abflussöffnungen erforderlich. Als Richtwert für die Größe des erforderlichen Öffnungsdurchmessers kann  $d \geq 1,5 \times t_{\text{Steg}}$  (mindestens jedoch 15 mm) angenommen werden.

Mit dem Verzinkungsbetrieb sind die Details im Einzelfall abzustimmen, insbesondere auch die Verwendung von Bohrungen als Anschlagpunkte für den Verzinkungsprozess.

Die Konstruktionsdetails sind gemäß DAST-Richtlinie 022, [25], Tabelle 4 wie folgt einzustufen:

- Bohrungen im Längsträgersteg mit  $d \geq 25$  mm: Detail 3 der Detailklasse A
- Bohrungen im Längsträgersteg mit  $d < 25$  mm: Detail 2 der Detailklasse B
- Querträger mit Kopfplatte und Durchflussöffnungen im Steg: Detail 1a der Detailklasse B



Durchmesser der Bohrung:  $d \geq 1,5 \times t_{\text{steg}}$   
 $\geq 15$  mm

1 =  $t_{\text{Steg}}$ , 2 = Hauptträger, 3 = Nebenträger

Bild 18: Detailausführung geschraubter Kopfplattenanschluss für den I-Querträger an den Hauptträger; links: Praxisbeispiel Montagezustand; rechts: verzinkungsgerechte Ausführung mit Durchflussöffnungen



Bild 19: Detailausführung I-Querträger mit Hauptträgersteg verschweißt

#### 6.3.4.6 | Geschweißter Anschluss eines I-Querträgers direkt an den Hauptträgersteg

Alternativ kann der I-Querträger auch mit dem Hauptträgersteg in Anlehnung an Kapitel 6.3.1.1 direkt verschweißt werden. Die Kammer des Hauptträgers ist oberhalb und unterhalb der Querträgerflansche mit Aussteifungsblechen zu ergänzen, um eine Lasteinleitung konstruktiv zu gewährleisten. Auch dieses Detail ist für vormontierte Trägerpaare sinnvoll einsetzbar. Diese können als Trägerpaare in Gesamt- oder Teillänge gemeinsam verzinkt werden.

Hierbei ist die Einschränkung der Elementbreite durch die Verzinkungsbäder zu beachten. Ein Anschließen von Trägerstummeln, Verzinken und nachträglichem Ergänzen von verzinkten Querträger mittels eines geschraubten Anschlusses, siehe Bild 9, ist auch für Querträger im Feld möglich. Von einem nach der Verzinkung eingeschweißtem Querträger mit nachträglich aufgebautem Korrosionsschutz wird abgeraten. Für die verzinkungsgerechte Ausführung gelten die gleichen Hinweise und Empfehlungen wie in Kapitel 6.3.4.4.

## 7 | Ausführung verzinkungsspezifischer Montagestoßdetails

### 7.1 | Allgemeine Vorüberlegungen

Da beispielsweise einzelne Brücken-Hauptträger mit einer Bauteillänge von mehr als circa 16 m aufgrund der Beschränkung der maximalen Bauteilgröße und des maximalen Bauteilgewicht nicht als kompletter Träger



Bild 20: Einheben vormontierter Trägerpaare und nachträgliches Verschweißen von I-Querträger an vorgefertigte Trägerstummel

feuerverzinkt werden können, sind Montagestöße vorzusehen. Die Träger werden somit in Teilen gefertigt und danach feuerverzinkt.

Die Lage der Montagestöße ist dabei möglichst günstig hinsichtlich der Belastung sowie auch der Zugänglichkeit zu Kontroll- und Wartungszwecken anzuordnen. Daher sind Stöße, beispielsweise zur Verringerung der Verkehrsbeeinträchtigungen einer unter der Brücke hindurchführenden Autobahn bei eventuell erforderlicher Durchführung von Korrosionsschutzausbesserungen an den Montagestößen, möglichst außerhalb oder zumindest sehr nah am Rand der Fahrspuren anzuordnen.

### 7.2 | Detail geschweißter Stumpfstoß

#### 7.2.1 | Montageablauf und Detailausbildung

Das Stoßen verzinkter Teilelemente zu einem Bauteil mit der geforderten Bauteillänge kann durch einen geschweißten Stumpfstoß erfolgen (Bedarfsstumpfstoß). Lage und Ausführung muss mit der Konstruktionsplanung und Bemessung abgestimmt werden. Die Stöße sind in den Ausführungszeichnungen darzustellen.

Zur gezielten Vermeidung einer Zinkannahme an den zu schweißenden Montagestößen während der Feuerverzinkung sind diese Stellen allseitig (inklusive Stirnflächen) mit einer ausreichenden Breite (Empfehlung: circa 100 mm [3] [13]) durch einen dafür geeigneten Abdecklack gemäß der Verarbeitungsvorschrift des Beschichtungsstoffherstellers zu beschichten.



Bild 21: Schweißnahtvorbereitung für einen geschweißten Stumpfstoß von warmgewalzten Breitflanschträgern für eine Verbundbrücke

Nach der Feuerverzinkung müssen die Träger-Einzelteile zusammengeschweißt werden. Diese Schweißstöße sollen möglichst im Werk ausgeführt werden, um optimale Bedingungen für die Durchführung zu gewährleisten. Nur für den Fall, dass der gesamte Träger nicht auf die Baustelle transportiert werden kann, sind die Schweißstöße auf der Baustelle herzustellen.

Zur Herstellung der Stumpfnaht müssen gemäß EN 1090-2 [18] in den Ausführungsklassen EXC3 und EXC4 An- und Auslaufbleche verwendet werden. Diese sind nach dem Schweißen wieder zu entfernen. Bei einem stumpf-

gestoßenen I-Träger kann in der Regel für die Stegnaht auf An- und Auslaufbleche verzichtet werden. DV-Schweißnähte (Bild 22, links) benötigen 4 Trägerpositionen zur Fertigung: 2-mal liegend und 2-mal stehend. Demgegenüber benötigt die Schweißstoßvariante mit V-Nähten (Bild 22, rechts) nur 2 Trägerpositionen, 2-mal liegend, und ist somit einfacher zu fertigen. Das Schweißvolumen und somit auch die Schweißzeit sind jedoch doppelt so hoch. Beide Varianten sind grundsätzlich möglich und die Vor- und Nachteile sind gegeneinander abzuwägen.

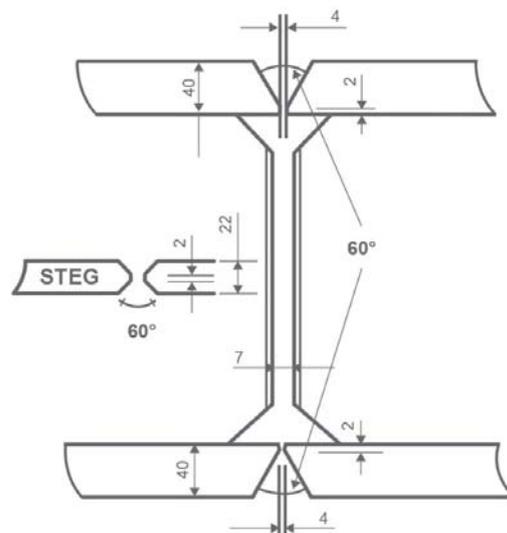
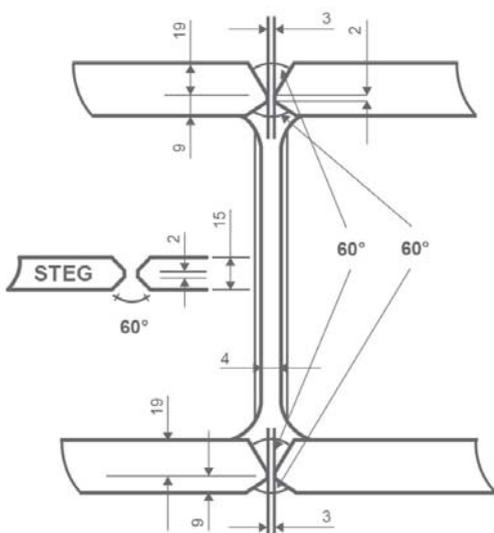
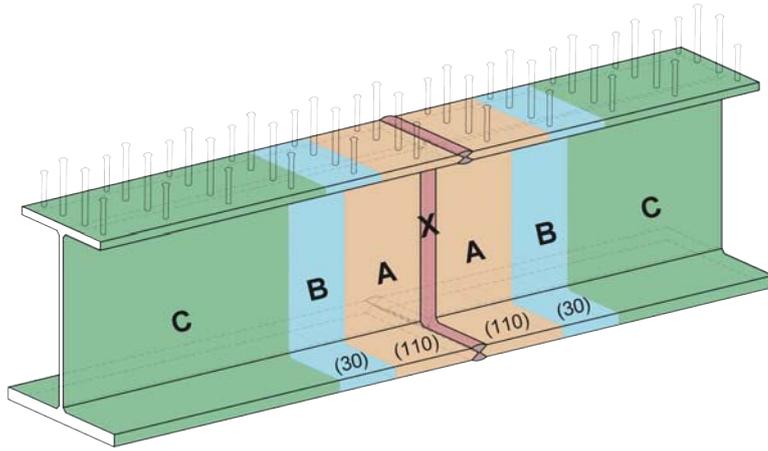


Bild 22: Details zu möglichen Ausführungsformen der Schweißnähte für Stumpfstoße



- X: Schweißnahtbereich
- A: durch Spritzmetallisierung auszubessernder Montage-schweißstoßbereich
- B: Übergangsbereich Spritzmetallisierung – Stückverzinkung
- C: unbeeinflusster Stückverzinkungsüberzug

Bild 23: Ausführung Montageschweißstoß [36]

Eine eventuell notwendige Vorwärmung im Bereich des Schweißstoßes soll mit Heizmatten erfolgen, um einen gezielten, gleichmäßigen Wärmeeintrag in das Blech sicherzustellen. Eine unplanmäßige Überhitzung der an den Schweißstoß angrenzenden feuerverzinkten Oberflächen durch eine Heizflamme ist unbedingt zu verhindern.

Die Nahtüberhöhung ist nach Beendigung der Schweißarbeiten maschinell einzuebnen.

### 7.2.2 | Applikation des Korrosionsschutzes am Schweißstoß

In Anlehnung und Ergänzung zu Pkt. 5.5 ZTV-ING: Baustellenschweißstöße wurde das in Kap. 3.4 beschriebene Verfahren für den Korrosionsschutz von Montagestößen feuerverzinkter Bauteile entwickelt [3] [13]. Die Oberflächenvorbereitung und die anschließende Spritzmetallisierung im Bereich der Montageschweißstöße ist gemäß Bild 23 auszuführen.

#### Für die Oberflächenvorbereitung der Teilflächen A gelten folgende Vorgaben:

Vor dem Schweißen sind die Rückstände des Abdecklacks, der zur Vermeidung der Zinkannahme appliziert wurde, im Bereich A des Montageschweißstoßes durch partielles maschinelles Schleifen der Oberfläche (Oberflächenvorbereitungsgrad: PMA) restlos zu entfernen. Hierbei ist sicherzustellen, dass der unmittelbare Schweißnahtbereich frei von möglichen Zinkresten ist. Der Übergangsbereich zwischen Bereich A

(unverzinkt) und Bereich B (feuerverzinkt) soll insoweit behutsam angeschliffen werden, dass ein sanfter Übergang erfolgt. Die Oberfläche im Bereich B soll so wenig wie möglich beeinträchtigt werden. Eine Behandlung oder Schädigung der Stückverzinkung im Bereich C durch Anschleifen ist absolut zu vermeiden. Daher ist der intakte Zinküberzug vor der Ausführung der Schleifarbeiten hinreichend zu schützen bzw. zu maskieren.

Nach dem Schweißen sind die Schweißnähte des Stumpfstoßes blecheben zu schleifen.

Vor der Spritzmetallisierung in den Teilflächen A ist gemäß ZTV-ING Teil 4, Abschnitt 3 [5] und DIN EN ISO 2063 [16] auf Stahl der Oberflächenvorbereitungsgrad Sa 3 bei einem Rauheitsgrad grob (G), mindestens jedoch eine mittlere Rautiefe mit  $R_{y5} = 85 \mu\text{m}$  (G) gemäß DIN EN ISO 8503-1 [54] mit einem gemäß DIN EN ISO 2063 [16] definierten Strahlmittel auszuführen. Als Verfahren wird hierfür das Druckluftstrahlen für Stahl nach DIN EN ISO 8504-2 [37] empfohlen. Als Strahlmittel sollten Schmelzkammerschlacke, Edelkorund, Hämatit-Hartgusskies oder Kupferhüttenschlacke verwendet werden.

Zur Vermeidung einer Schädigung der Stückverzinkung im Übergangsbereich B beidseitig des Montageschweißstoßes durch den Strahlprozess ist der intakte Zinküberzug vor der Ausführung der Strahlarbeiten auf einer Breite von mindestens 300 mm hinreichend zu schützen bzw. zu maskieren. Ziel ist ein geradliniger, sauberer Abschluss zwischen den Bereichen A und B.

## **Für die Oberflächenvorbereitung der Teilflächen B gelten folgende Vorgaben:**

Als Verfahren für die Oberflächenvorbereitung im Übergangsbereich B, zwischen der Spritzmetallisierung und der Stückverzinkungsschicht, ist das Sweep-Strahlen für Zink anzuwenden. Hierbei wird die Zinkoberfläche durch ein sanftes Strahlen mit nichtmetallischem Strahlmittel auf einer Breite von mindestens 30 mm schonend aufgeraut. Die angrenzenden Bereiche C sind ausreichend vor Beschädigung sowie Verunreinigung zu schützen.

Die Sweep-Strahl-Parameter für das manuelle Druckluftstrahlen müssen den nachfolgenden Kriterien (gemäß „Verbände-Richtlinie Duplex-Systeme“ [38] und DIN 55633 [39]) entsprechen:

- Strahlmittel: nichtmetallische Schlacken, Korund, Chromgussgranulate, Glasbruch, Glasperlen
- Teilchengröße Strahlmittel: 0,25 bis 0,50 mm
- Strahlendruck an der Düse: 2,5 bis 3,0 bar
- Strahlwinkel: < 30° zur Oberfläche (Bauteilgeometrie beachten)

Der in der genannten Breite maskierte Überlappungsbereich der Feuerverzinkung (Bereich B) ist bis zu einer maximalen mittleren Rautiefe  $R_{v5} = 40 \mu\text{m}$  (G) zu sweepen. Der maximale Abtrag der Feuerverzinkung darf dabei nicht mehr als  $15 \mu\text{m}$  betragen.

### **Spritzmetallisierung und Versiegelung**

Die Spritzmetallisierung ist nach den Vorgaben der DIN EN ISO 2063 [16] zu applizieren. Abweichend ist jedoch die Überzugsdicke an die Vorgabe für die Stückverzinkungsschicht anzupassen. Als Spritzwerkstoff ist ZnAl15 gemäß DIN EN ISO 2063 [16] zu verwenden. Die Verarbeitung des Spritzwerkstoffes hat durch Flamm-spritzen zu erfolgen.

Nach der Spritzmetallisierung ist gemäß ZTV-ING Teil 4, Abschnitt 3 [5] zeitnah eine porenschließende Beschichtung (Versiegelung) auf die spritzmetallisierten Flächenbereiche zu applizieren. Die gemäß Datenblatt des Beschichtungsstoffherstellers für die Versiegelung angegebenen Verarbeitungsbedingungen und Schichtdicken sind einzuhalten. Die Farbgebung der Versiegelung kann frei gewählt werden.

### **7.2.3 | Arbeitsproben**

Es wird empfohlen, vor der Fertigung der Brückenbauteile gesonderte Arbeitsproben aus dem für das Projekt vorgesehenen Stahlwerkstoff herzustellen. Hierbei sollten die tatsächlich eingesetzten Abmessungen und Verfahren berücksichtigt und angewandt werden.

Die Arbeitsproben dienen zur Sicherstellung der erforderlichen Zinkschichtdicke im Hinblick auf eine prognostizierte Korrosionsschutzdauer von 100 Jahren, zur fachgerechten Herstellung des Montageschweißstoßes einschließlich der Ausbesserung und gegebenenfalls zur Überprüfung der farblichen Gestaltung der Versiegelung.

Der Umfang der notwendigen Arbeitsproben ist vorab zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer abzustimmen.

### **7.3 | Detail geschraubter Laschenstoß**

Für die Ausbildung und Ausführung von geschraubten Laschenstößen sind zunächst die Regelungen der EN 1993-1-8 [30] und EN 1090-2 [18] zu beachten. Löcher sind zu bohren und sollen aus Gründen der Eigenschaften hinsichtlich der Werkstoffermüdung insbesondere bei Scher-Lochleibungsverbindungen auch mit Passschrauben nicht gestanzt werden [40].

Die Ermüdungsfestigkeit geschraubter Verbindungen kann durch eine planmäßige Vorspannung der Schrauben merklich gesteigert werden.

Bei Verwendung einer gleitfest vorgespannten Verbindung (GV) sind die zu verbindenden Oberflächen durch Sweep-Strahlen vorzubereiten und anschließend mit einer Alkali-Silikat (ASi)-Beschichtung mit einer Dicke von 50 - 80  $\mu\text{m}$  zu versehen, um die Gleitflächenklasse B mit einem Reibbeiwert  $\mu = 0,4$  zu erreichen (vgl. hierzu auch Kapitel 5.2).



Bild 24: Geschraubter Laschenstoß der Hauptträger einer Verbundbrücke in Istanbul, Türkei

Für den dauerhaften Korrosionsschutz und zur Vermeidung von Spaltkorrosion ist bei einer geschraubten Laschenverbindung darauf zu achten, dass sämtliche Spalte, die kleiner als 1 mm sind, dauerhaft zu schließen sind. Bei den an den zu verbindenden Bauteilen anliegenden Laschen wird diese Mindest-Spaltbreite in der Regel unterschritten werden, so dass eine Spaltkorrosion begünstigt wird. Beim o.g. Verfahren mit der ASi-Beschichtung ist davon auszugehen, dass die aufgetragene Beschichtung diese Dichtung übernimmt.

## 8 | Prüfung, Überwachung, Qualitätssicherung

### 8.1 | Prüfung der Stahlkonstruktion

Die in den für den Brückenbau relevanten Normen und Regelwerken vorgegebenen Prüfungen der Stahlkonstruktion sind einzuhalten bzw. auszuführen. Zusätzlich sollte eine optische Prüfung der verzinkten Bauteile auf makroskopisch wahrnehmbare Beschädigungen sowie eine systematische Überprüfung mittels des MT-Verfahrens gemäß Anlage 3 der DAST-Richtlinie 022 [25] zum Ausschluss von Rissbildung infolge flüssigmetallinduzierter Spannungsrisskorrosion durchgeführt werden. Die kritischen Punkte der zu untersuchenden Bauteile sind der DAST-Richtlinie 022 [25] zu entnehmen oder in Abstimmung zwischen Bauherren, Statiker, Stahlbauer, Prüfenieur und Verzinker festzulegen.

### 8.2 | Prüfung der Zinkschichtdicke

Die Prüfung der Schichtdicke von Zinküberzügen wird üblicherweise mittels magnetinduktiven Verfahren (ISO 2808 [41]) oder magnetischen Verfahren (ISO 2178 [42], ISO 3882 [43]) durchgeführt. Messgeräte, die nach dem magnetischen Messverfahren arbeiten, messen entweder die magnetische Anziehung zwischen einem permanenten Magneten und dem Grundmaterial, die durch das Vorhandensein eines Überzuges beeinflusst wird oder die Abschwächung des magnetischen Flusses durch den Überzug in das Grundmaterial.

Um ein repräsentatives Ergebnis der durchschnittlichen Schichtdicke je Einheit/Bauteil zu erlangen, müssen die Anzahl und Lage der Kontrollflächen und ihre Größe für das magnetische Verfahren entsprechend der Form und Größe des/der Bauteils/e ausgewählt werden. Hierfür werden folgende Empfehlungen in Übereinstimmung mit [5] gegeben:

- Die Zinkschichtdicke ist an mindestens drei artgleichen Bauteilen (Prüfmuster) zu prüfen.
- Bei einer Bauteilfläche größer 2 m<sup>2</sup> ist die Schichtdicke an mindestens drei Kontrollflächen zu prüfen. Bei kleineren Flächen kann die Anzahl der Kontrollflächen reduziert werden.

- Bei langen Teilen muss die Kontrollfläche etwa 100 mm von Löchern und 100 mm von den Bauteilenden sowie etwa in Bauteilmitteln liegen und muss den gesamten Querschnitt des Teils umfassen. Je Kontrollfläche ist die Zinkschichtdicke mittels fünf Einzelmessungen aufzunehmen (örtliche Zinkschichtdicke). Die Prüfung auf Erfüllung der Anforderung der Schichtdicke erfolgt mit dem gemittelten Wert der Einzelmessungen für jede Kontrollfläche (durchschnittliche Zinkschichtdicke). Die örtlich gemessene Zinkschichtdicke darf, in Anlehnung an [9], im Einzelfall um bis zu 20 % unter der Soll-Zinkschichtdicke liegen, sofern der Mittelwert je Kontrollfläche die Schichtdickenanforderung erfüllt.

An den Brückenbauteilen ist die Zinkschichtdicke direkt nach dem Prozess des Feuerverzinkens nach o.g. Anforderungen zu überprüfen. Sollte die geforderte Mindestschichtdicke wesentlich unterschritten worden sein, sind weitere Maßnahmen mit dem Auftraggeber im Hinblick auf die verminderte Korrosionsschutzdauer abzustimmen.

Zusätzlich sind entsprechend ZTV-ING [5] die Kontrollflächen an folgenden Punkten vorzusehen:

- In Bauwerksbereichen, bei denen eine Instandsetzung der Korrosionsschutzbeschichtung mit hohen Begleitkosten, z.B. für Rüstungen, oder mit nennenswerten Betriebsbehinderungen verbunden ist sowie
- an Stellen, die für die örtlichen Korrosionsbelastungen charakteristisch sind (z.B. Bereiche über der Fahrbahn von tausalzbehandelten Straßen).

Die Kontrollflächen sind nach Art, Größe und Lage in einem Korrosionsschutzplan zu kennzeichnen. Ein Kontrollflächenprotokoll ist nach Anhang B, ZTV-ING [5] zu führen.

### 8.3 | Qualitätssicherung der Spritzmetallisierung

Die Qualitätssicherung der Spritzmetallisierung erfolgt gemäß den Vorgaben der EN ISO 14922 Teil 1 bis 3 [44]. Der ausführende Fachbetrieb muss eine entsprechende Qualifizierung gemäß [44] zur Ausführung der Spritzmetallisierung besitzen. Alle thermischen Spritzer müssen durch eine geeignete Prüfung nach EN ISO 14918 [45] anerkannt sein, alle Prüfungsbescheinigungen sind auf dem Laufenden zu halten. Der Hersteller muss über geeignete Einrichtungen und Personal gemäß EN ISO 12690 [46] zur Beaufsichtigung der Spritzarbeiten verfügen, die die ordnungsgemäße Ausführung der Arbeiten steuern.

Die Prüfung der Schichtdicken ist nach EN ISO 2178 [42] durchzuführen. Hierbei ist die Schichtdicke an mindestens drei unterschiedlichen Stellen je Bereich (A, B und C, Bild 23) zu messen und auf Erfüllung der festgelegten Anforderung zu überprüfen. Eine etwaige Haftfestigkeitsprüfung ist nach Anhang A der EN ISO 2063 [16] durchzuführen, jedoch nur an einer adäquaten Arbeitsprobe, da es sich um eine zerstörende Prüfung handelt. Allerdings ist bei Einhaltung des in Kap. 3.4 beschriebenen Verfahrens von einer ausreichenden Haftfestigkeit auszugehen.

Die Kontrollflächen sind nach Art, Größe und Lage in einem Korrosionsschutzplan zu kennzeichnen. Ein Kontrollflächenprotokoll ist nach Anhang B, ZTV-ING [5] zu führen und der Bauwerks-Dokumentation beizufügen.

## 9 | Wirtschaftliche Betrachtung

### 9.1 | Allgemeines

Die abgeminderte Ermüdungsfestigkeit der feuerverzinkten Stahlbauteile lässt unter Umständen vermuten, dass dies entscheidende Auswirkungen auf die Dimensionierung des Tragwerks hat und Querschnitte dadurch im Vergleich zur unverzinkten Ausführung vergrößert werden müssten. Dagegen spricht, dass insbesondere bei Straßenbrücken der Ermüdungsnachweis in den meisten Fällen keinen sehr hohen Ausnutzungsgrad hat, so dass dort noch Reserven vorhanden sind. Daher ist hinsichtlich des eingesetzten Stahls eine Kostenneutralität wahrscheinlich. Dies belegen auch diverse Studien [36] [47] [48]. Allein bei ungünstigen Kombinationen aus kurzer Spannweite, hoher Stahlgüte und hoher statischer Ausnutzung kann es erforderlich werden, die Querschnitte zu erhöhen.

Ein erhöhter Aufwand ergibt sich eventuell aus den zusätzlich erforderlichen Maßnahmen an den Stoßstellen von Trägern, die länger als ca. 16 m sind. Dies ist begründet in den begrenzt zur Verfügung stehenden Zinkbadabmessungen. Je nach Art der Verbindung – Schrauben oder Schweißen – sind unterschiedliche Maßnahmen zu ergreifen, die sich auf die Herstellungskosten signifikant auswirken können.

Studien der BAST [51] und der TU Dresden [49] zeigen jedoch exemplarisch, dass selbst bei Betrachtung der Erstkosten die feuerverzinkte Brücke die wirtschaftlichste Lösung darstellen kann.

Betrachtet über den Lebenszyklus der Brücke werden jedoch eventuelle Mehrkosten bei der Herstellung durch Querschnittsvergrößerung und/oder zusätzliche Stöße wieder eingespart. Schon nach 33 Jahren, also dem ersten Instandsetzungsintervall einer organischen Korrosionsschutzbeschichtung, liegen die Lebenszykluskosten deutlich günstiger als bei konventionellen Korrosionsschutzsystemen [36] [49].

### 9.2 | Auswirkungen der Kerbfall-Abminderung

Die teilweise notwendige Herabstufung der Kerbfallkategorien feuerverzinkter Details im Vergleich zu unverzinkten, genormten Details wirft die Frage nach der Auswirkung hinsichtlich eines möglicherweise erhöhten

Materialeinsatzes auf und damit verknüpft nach der Wirtschaftlichkeit einer feuerverzinkten Brücke. Zur Klärung wurde eine Vergleichsrechnung an einer – für den vorgesehenen Anwendungsfall typischen – Verbundbrücke durchgeführt [47].

Folgende Kenndaten der Brücke liegen der Gegenüberstellung zugrunde:

- Verkehrsweg-Brücke über einen Fluss im ländlichen Raum
- Stützweite: 35,30 m (keine Mittelstütze)
- Fahrbahnbreite: 8,50 m (2-streifig)
- Gesamtbreite zwischen Geländern: 13,75 m
- Brückenfläche: 485 m<sup>2</sup>
- Stahlsorte: S355J2+N

Die Konstruktion wurde zur Aufnahme der statischen Lasten nach LM 1 gemäß [50] dimensioniert. Aus der statischen Berechnung resultiert eine maximale Stahlspannung von 351 N/mm<sup>2</sup>, was einer Ausnutzung des relevanten Querschnitts zu 99 % entspricht.

Die Nachweise gegen Werkstoffermüdung werden mit dem Ermüdungslastmodell LM 3 nach DIN Fachbericht 101 bzw. EC 1-2 [50] durchgeführt. Maßgebend war hierbei ein angenommener Stumpfstoß in der Mitte des höchstbeanspruchten Feldbereichs. Die Nachweisform lautet:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf} \quad (9.1)$$

mit  $\gamma_{Ff} = 1,0$  und  $\gamma_{Mf} = 1,15$  (zugänglich, hohe Schadensfolgen).

und

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \varphi_{fat} \cdot \Delta\varphi_{fat} \cdot \Delta\sigma_p \quad (9.2)$$

Zusätzlich wurde der Faktor  $\varphi_{fat}$  eingefügt. Bei dem Nachweis gegen Werkstoffermüdung wurde  $\varphi_{fat} = 1,2$  (gute, da neue Fahrbahnoberfläche) und  $\Delta\varphi_{fat} = 1,0$  (Nachweis im Feldbereich) angesetzt: Der dynamische Beiwert  $\Phi_2$  ist gemäß [21] ebenfalls gleich 1,0, da  $\Phi_2$  bereits im Ermüdungslastmodell enthalten ist. Der schadensäquivalente Erhöhungsfaktor  $\lambda$  wurde mit dem Maximalwert  $\lambda = \lambda_{max} = 2,0$  angesetzt. Die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite betrug  $\Delta\sigma_{E,2} = 62$  N/mm<sup>2</sup>. Somit lautet der Nachweis in diesem Fall:

$$1,0 \cdot 62 \text{ N/mm}^2 \leq 80 / 1,15 = 70 \text{ N/mm}^2 \text{ (Ausnutzungsgrad} = 89 \%)$$

Eine pauschale Abminderung der Widerstandsseite um einen Kerbfall zur Berücksichtigung des Einflusses der Feuerverzinkung wäre unter verschiedenen Aspekten konservativ. Zum einen wurde für das vorliegende Detail „Längsnaht über Quernaht“ der Kerbfall 80 auch für die feuerverzinkte Ausführung bestätigt, zum anderen wird von dem ungünstigsten, aber unwahrscheinlichen Fall ausgegangen, dass der Stoß genau in Feldmitte liegt. Mit dem um eine Kategorie abgeminderten Kerbfall 71 – entgegen der o.a. Tabelle 4, ergibt sich folgendes Ergebnis:

$$1,0 \cdot 62 \text{ N/mm}^2 \leq 71/1,15 = 62 \text{ N/mm}^2 \text{ (Ausnutzungsgrad} = 100 \text{ \%)},$$

womit der Nachweis gegen Werkstoffermüdung immer noch erfüllt wird. Dies bedeutet, dass trotz der Abminderung des Ermüdungswiderstands keine Vergrößerung der Querschnitte erfolgen muss. Es wird in dem untersuchten Beispiel somit auch kein Stahl

zusätzlich benötigt, was hinsichtlich des Stahlverbrauchs Kostenneutralität bedeutet.

Dieses Ergebnis wurde durch weitere Untersuchungen auch an vielen anderen Brücken im Bereich kleiner und mittlerer Spannweiten bestätigt. [48]

### 9.3 | Kostenquellen

Neben den reinen Kosten für die Stückverzinkung sowie den obligatorischen Kosten für Transporte vom Stahlbau-betrieb zur Verzinkerei fallen bei größeren Brückenbauwerken (ab ca. 16 m Spannweite) weitere Kosten für die Herstellung von Montagestößen (vgl. Kap. 7) aufgrund der begrenzten Zinkbadabmessungen an. Die Kosten hierfür gliedern sich im Wesentlichen in zusätzliche Vorbereitungsmaßnahmen, Schweißarbeiten und anschließende Nachbearbeitungen des Korrosionsschutzes auf. Zusätzlich können Arbeitsproben für die Sicherstellung der Qualität und der geforderten Zinkschichtdicke benötigt werden.

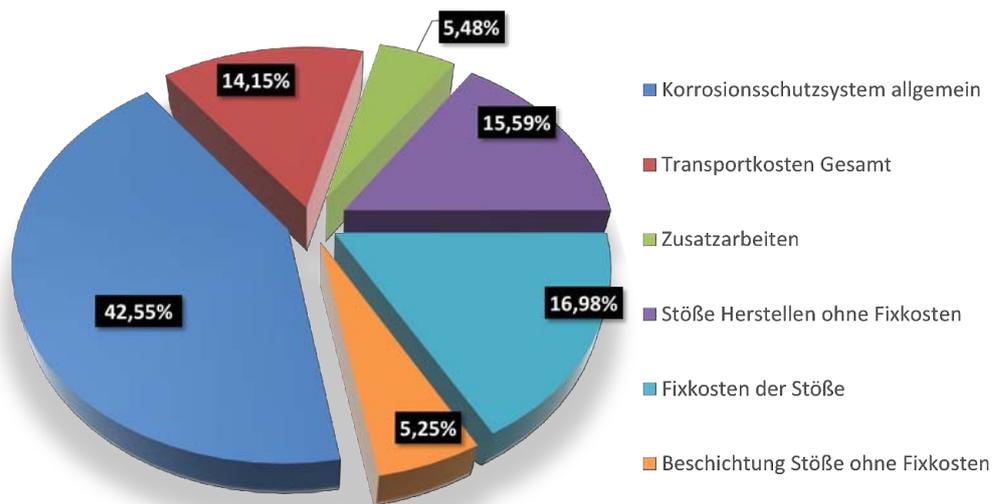


Bild 25: Zusammensetzung der Kosten für das Korrosionsschutzsystem Zinküberzug [3]

Zusammenfassend enthält Bild 25 eine Übersicht über die anteilige Kostenverteilung für das Korrosionsschutzsystem Feuerverzinkung an einem Beispielobjekt. [3] Im Vergleich einer Feuerverzinkung zu einer organischen Beschichtung liegen die Gesamtkosten der Erstinvestition in etwa gleicher Größenordnung. Lediglich die Kostenverteilung ist unterschiedlich (Bild 26). Für die reine Feuerverzinkung ist der Kostenanteil, ohne die zusätzlichen Transportkosten und im Vergleich zu einer organischen Beschichtung im Werk, zunächst niedriger. Die zusätzlichen Kosten für erforderliche Maßnahmen an Stößen wiegen den Vorteil jedoch auf und sorgen für Kostenneutralität. Entscheidende Kostenvorteile wird es daher bei der Feuerverzinkung geben, insofern aufgrund einer sehr kurzen Spannweite keine Stöße erforderlich sind. Projektspezifische Abweichungen im Vergleich sind hierbei möglich und ggf. zu überprüfen.

#### 9.4 | Kosten für den Korrosionsschutz über die Nutzungsdauer von 100 Jahren

Bereits zum Zeitpunkt des Neubaus kann das Korrosionsschutzsystem Stückverzinkung mit > 200 µm Überzugsdicke bis zu einer Korrosivitätskategorie C4 eine niedrigere Erstinvestition erfordern und somit die wirtschaftlichere Wahl darstellen. Eine Instandsetzung des Zinküberzugs wird voraussichtlich nicht benötigt, wodurch spätestens im Laufe des Bauwerks-Lebenszyklus wirtschaftliche Vorteile für eine feuerverzinkte Brückenvariante zu erwarten sind.

Die konkreten Aussagen zur Wirtschaftlichkeit hängen in jedem Fall von der Vorhersagesicherheit des Korrosionsverhaltens über die geplante Nutzungsdauer von 100 Jahren ab. So können Schwankungen der korrosiven Einflüsse gegenüber den angenommenen Belastungen

#### 1 = FEUERVERZINKUNG; 2 = ORGANISCHE BESCHICHTUNG

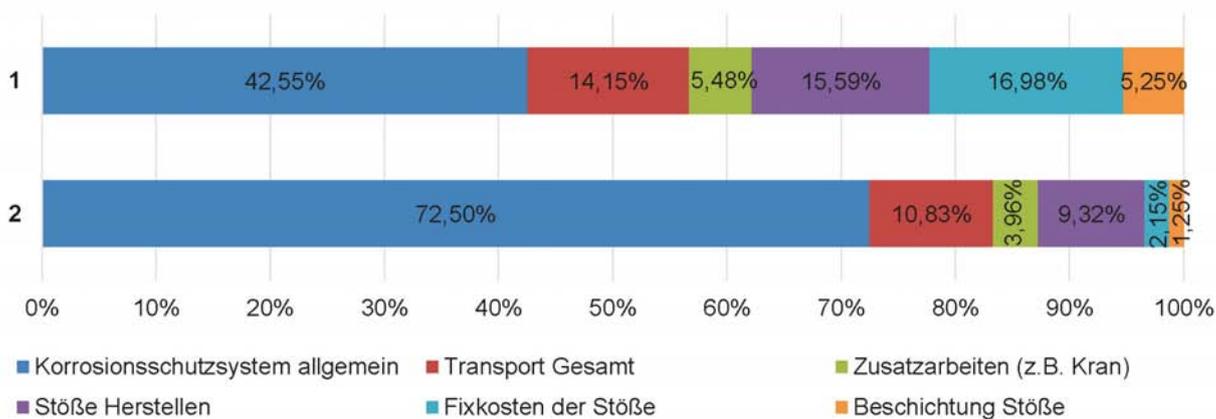


Bild 26: Kostenanteile für den Korrosionsschutz, getrennt je System [3]

während der Nutzungsdauer des Bauwerkes auftreten und durch Veränderungen der Umgebungsbedingungen die Schutzdauer des Zinküberzuges beeinflussen. Setzt man den ungünstigen Fall einer erhöhten Korrosivität voraus und geht von maximal einer notwendigen Instandsetzung des Korrosionsschutzes Feuerverzinkung über die Lebensdauer der Brücke aus (vgl. Kap. 3.3), so wird dennoch mindestens eine Instandsetzung im Vergleich zum Schutz durch organische Beschichtungen eingespart, was in der Summe zu einer Kosteneinsparung über den gesamten Lebenszyklus der Brücke führen wird [36] [51].

Ein Vergleich von Lebenszykluskosten eines Brückenbauwerks unter der Annahme von unterschiedlichen Korrosionsschutzsystemen wurde auch im Rahmen eines Forschungsprojekts der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [51] durchgeführt. Dabei wurde eine organische Beschichtung, unter der Annahme einer zweimaligen Erneuerung im Lebenszyklus der Brücke, einer Feuerverzinkung in zwei verschiedenen Schichtdicken gegenübergestellt. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass bei geringerer Schichtdicke der Feuerverzinkung nach ca. 66 Jahren eine Instandsetzung des Korrosionsschutzes durch Aufbringen einer organischen Beschichtung erfolgen sollte.

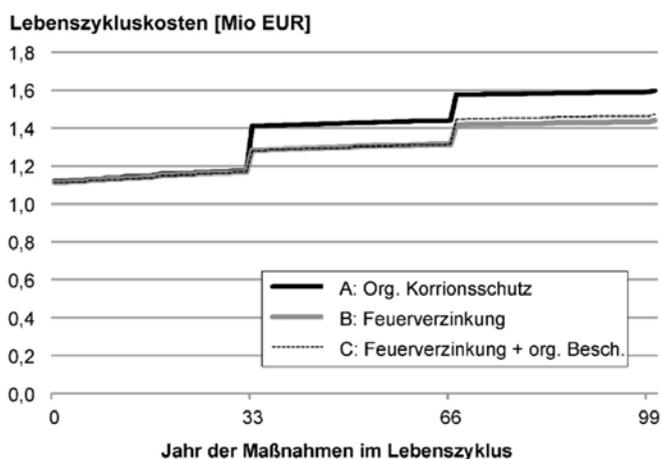


Bild 27: Verlauf der Lebenszykluskosten für die untersuchten Korrosionsschutzvarianten [51]

Die Berechnung der Herstellungskosten zeigte bereits bei der Feuerverzinkung eine Reduzierung gegenüber der Beschichtung, hinzu kommen weitere Einsparungen über die Nutzungsdauer aufgrund des Wegfalls von Instandhaltungsmaßnahmen und daraus resultierenden externen Kosten, wie beispielsweise Staus, die ebenfalls ermittelt wurden.

Betrachtet man allein die externen Kosten (Umweltwirkungen aus Fahrzeugbetrieb, Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten, siehe Bild 28), ergeben sich vor allem Unterschiede im Jahr 66 des Lebenszyklus, in dem die zweite Vollerneuerung der organischen Beschichtung bzw. die Instandsetzung der dünneren Zinkschicht neben weiteren Arbeiten ansteht (vgl. Tabelle 5 im folgenden Kapitel Nachhaltigkeitsbetrachtung). Die Entstehung der externen Kosten in Höhe von ca. 0,7 Mio. EUR bei der feuerverzinkten Variante B (ohne Instandsetzung der Feuerverzinkung) resultiert aus der dann notwendigen Betoninstandsetzungsmaßnahmen am Überbau und wird nicht durch die Stahlträger verursacht. Insgesamt ergibt sich ein Kostenvorteil für die Feuerverzinkung (Variante B) von 20 % und für Variante C (organische Beschichtung der feuerverzinkten Stahlträger im Jahr 66) von immer noch 12 % bezogen auf die gesamten externen Kosten der mit einer Beschichtung ausgeführten Variante A.

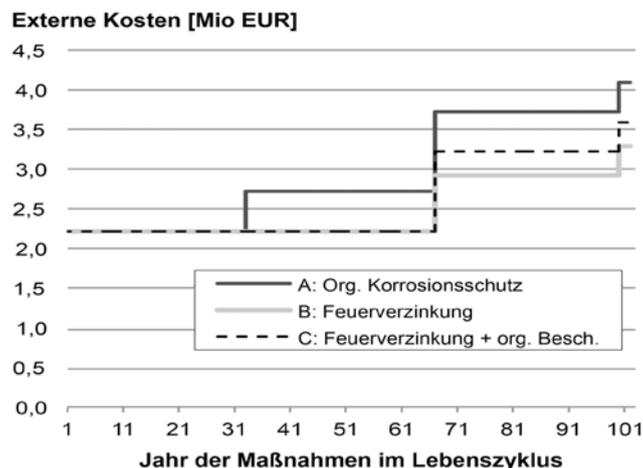


Bild 28: Externe Kosten über den gesamten Lebenszyklus für die drei Varianten [51]

## 10 | Nachhaltigkeitsbetrachtung

### 10.1 | Allgemeines zur Verzinkung

Zink kann – wie auch Stahl – einfach und unbegrenzt recycelt werden. Die derzeitige Recyclingquote von Zink liegt nach Auskunft des Industrieverband Feuerverzinken e.V. bei 80 %. So werden beispielsweise alte, verzinkte Produkte im Zuge der Elektrostahlerzeugung mit anderen Stahlschrotten voll recycelt. Bei diesem Prozess verflüchtigt sich das Zink sehr früh und kann als Filterstaub, so genannter EAF-Staub (Electric Arc Furnace = Elektrostahl-Staub), aufgefangen, in speziellen Anlagen recycelt und der primären Zinkproduktion wieder zugeführt werden.

Neben den verzinkten Stahlprodukten werden auch die verzinkungsseitigen Prozessnebenprodukte weitestgehend wieder aufbereitet. Zinkasche, die durch Oxydation der Zinkbadoberfläche entsteht als auch Hartzink, eine Mischung aus Zink und Eisen, das sich auf dem Zinkbadboden ansammelt, werden im Verzinkungsprozess systematisch gesammelt und dem Recyclingprozess zugeführt.

## 10.2 | Nachhaltigkeitsbetrachtung

### 10.2.1 | Studie der TU Berlin

Zur Bewertung der Umweltbelastung infolge des Feuerverzinkungsprozesses führte die TU Berlin eine vergleichende Studie von Korrosionsschutzsystemen für Stahlbauten durch. Eine Beschichtung nach DIN EN ISO 12944 [24] und das Feuerverzinken nach DIN EN ISO 1461 [9] wurden angelehnt an die Methode der Ökobilanz untersucht. Es wurde für beide Schutzsysteme eine Nutzungszeit von 60 Jahren in der Korrosivitätskategorie C3 angenommen.

Bei der Beschichtung wurde dabei von einer zweimaligen Instandsetzung nach 20 und 40 Jahren ausgegangen. Im Ergebnis zeigt sich, dass das Korrosionsschutzsystem Feuerverzinken für ein langlebiges Stahlbauobjekt gegenüber einem Beschichtungssystem die geringeren Umweltbelastungen darstellt.

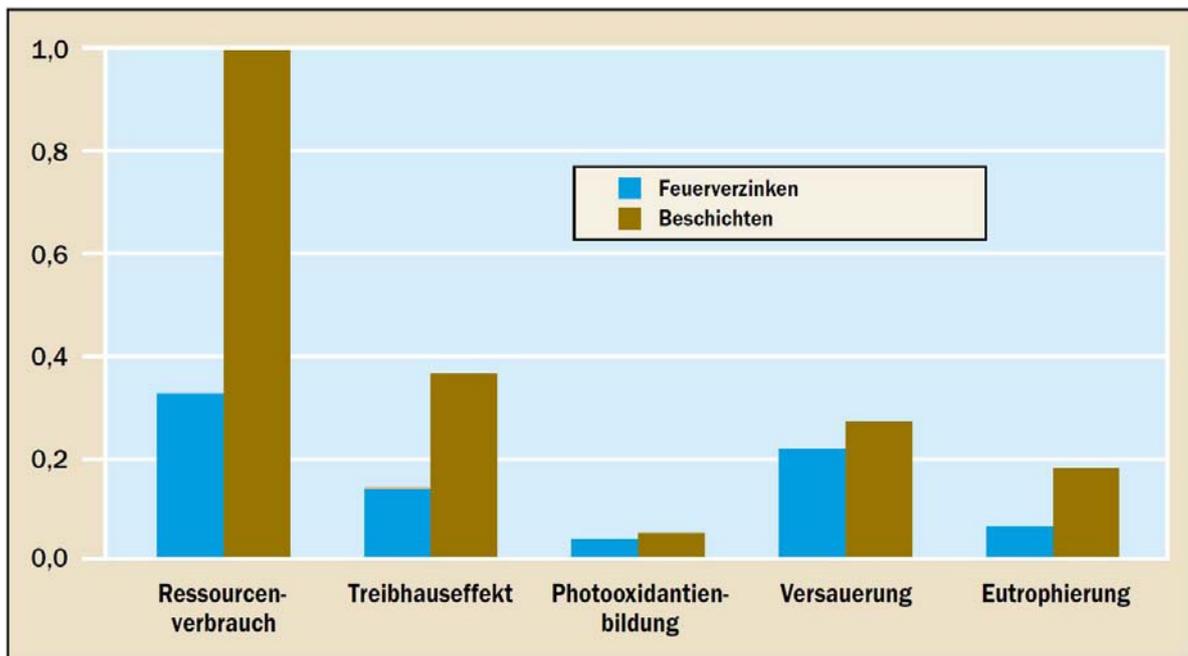


Bild 29: Umweltbelastung in verschiedenen Wirkungskategorien im Vergleich [52]

## 10.2.2 | Studie BAST

Im Rahmen des Forschungsprojekts der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [51] wurde die Nachhaltigkeit von unterschiedlichen Korrosionsschutzsystemen anhand eines realen Brückenbauprojekts untersucht (vgl. Kapitel 9.4). Über den gesamten Lebenszyklus – von der Herstellung, über die Nutzung bis zum Abriss – der untersuchten, integralen Autobahnüberführung mit 45 m Spannweite wurde eine Ökobilanz erstellt, die Lebenszykluskosten sowie die externen Effekte ermittelt und für drei Varianten verglichen.

Für die Brücke wurden die Bauwerksdaten sowie die Herstellungsprozesse erfasst. Für die Nutzungsphase sind sinnvolle Annahmen für die Instandhaltung getroffen worden. Dabei wurde die sogenannte „zustandsbestimmende Instandhaltungsstrategie“ zu Grunde gelegt (vgl. Tabelle 5) [2] [51] [53]. Diese sieht eine Bündelung von Maßnahmen nach 33 und 66 Jahren des Lebenszyklus vor. Ebenso werden für das Ende des Lebenszyklus Annahmen für den Rückbauprozess und den Umgang mit den rückgebauten Materialien getroffen.

Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass erhöhte Umweltwirkungen aus dem Herstellungsprozess der feuerverzinkten Brückenvariante während der Nutzungsphase kompensiert werden.

Die durch Instandsetzungsmaßnahmen notwendigen Eingriffe in den Verkehr (z.B. geänderte Geschwindigkeiten im Bereich der Baustelle) lassen Schadstoffausstöße und Treibstoffverbräuche ansteigen. Diese Emissionen verursachen für die untersuchten Varianten nicht nur Kosten, sondern auch Umweltwirkungen, die in der Größenordnung der Emissionen des Brückenbauwerks selbst und teilweise sogar darüber liegen. Bei der Berechnung von Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten (vgl. Bild 28) übersteigen auch diese externen Kosten die Lebenszykluskosten des Brückenbauwerks in allen Varianten. Daher gilt es, nicht nur aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, sondern auch aus Umweltschutzgründen, die Instandhaltungsmaßnahmen auf ein Minimum zu beschränken, wozu der Einsatz der Feuerverzinkung als Korrosionsschutz einen entscheidenden Beitrag leisten kann.

Tabelle 5: Verwendetes Instandhaltungsszenario: „Zustandsbestimmende Instandhaltungsstrategie“

Jahr	Instandsetzungsmaßnahme
0	Herstellung
17	Fahrbahn: Deckschicht
33	Vollerneuerung organische Korrosionsschutzbeschichtung  Fahrbahn: Deckschicht + Abdichtung  Kappen, Entwässerung, Schutzeinrichtungen
50	Fahrbahn: Deckschicht
66	Vollerneuerung organische Korrosionsschutzbeschichtung bzw. Instandsetzung Feuerverzinkung geringer Schichtdicke durch Aufbringung einer organischen Beschichtung  Betoninstandsetzung  Fahrbahn: Deckschicht + Abdichtung  Kappen, Entwässerung, Schutzeinrichtungen
83	Fahrbahn: Deckschicht
100	Rückbau

### 10.3 | Umwelt-Produktdeklaration (EPD)

Für die Berechnung der Umweltwirkungen eines Bauwerks über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg sind unter anderem detaillierte Informationen über die verwendeten Bauprodukte erforderlich. Umweltkennzeichnungen, die nach ISO-Systematik dem Typ III zugeordnet werden, werden als Umwelt-Produktdeklarationen, kurz: EPD, bezeichnet und basieren für Bauprodukte auf den Normen DIN EN ISO 14025 und DIN EN 15804. Sie enthalten quantitative Produktinformationen, die einer Ökobilanz entstammen und durch unabhängige Dritte verifiziert werden müssen. EPDs dienen der objektiven und detaillierten Information über ein Produkt und seine Eigenschaften im Hinblick auf die resultierenden Umwelteinwirkungen. Zusätzlich zu den Informationen aus der Ökobilanz können EPDs weitere technische Informationen enthalten. So können Sie unter anderem als verlässliche Datengrundlage für die Lebenszyklusanalyse eines Bauwerkes und als Nachweis für geforderte Eigenschaften von Bauprodukten dienen.

Für feuerverzinkten Baustahl liegt seit 2013 eine Umwelt-Produktdeklaration vor, die auf Grundlage der EPD für Baustähle (offene Walzprofile und Grobbleche) erarbeitet und durch das Institut Bauen und Umwelt (IBU) als unabhängige Dritte verifiziert wurde [55][56]. Enthalten sind objektive Daten und Fakten über die Auswirkungen von Baustählen und feuerverzinkten Baustählen auf Mensch und Umwelt, so dass mit Hilfe der EPDs verlässliche und transparente Umweltdaten vorgelegt werden können. Beide Umwelt-Produktdeklarationen haben eine Gültigkeit von 5 Jahren und sind frei verfügbar unter [www.ibu-epd.com](http://www.ibu-epd.com) sowie unter [www.bauforumstahl.de](http://www.bauforumstahl.de).

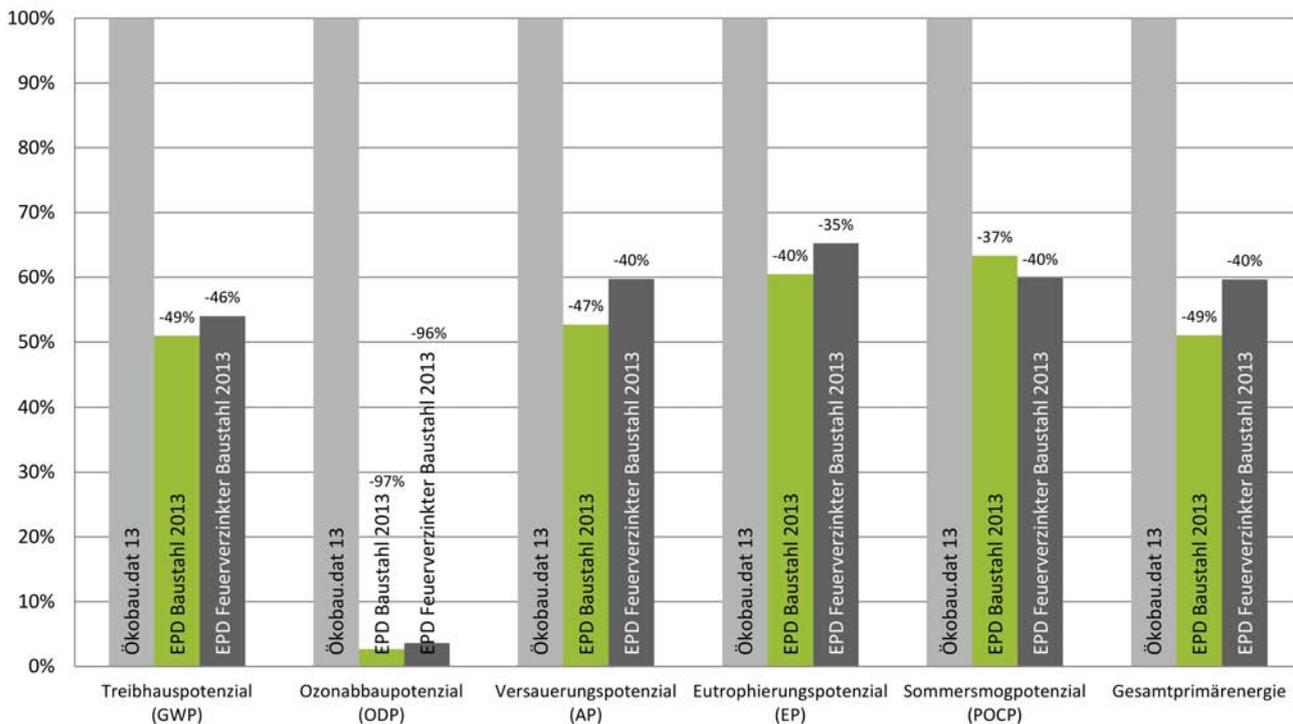


Bild 30: Vergleich der Ökobau.dat 2013 (Datensatz unverzinkter Baustahl) mit den EPDs für Baustahl [57] und feuerverzinkten Baustahl (2013) [56]. Das Recyclingpotenzial wurde in allen Datensätzen berücksichtigt.

Vergleicht man die Daten der beiden EPDs für Baustahl mit den auf Deutschland bezogenen Durchschnittsdaten aus der ÖKOBAUDAT, der offiziellen Datenbank des Bauministeriums ([www.oekobaudat.de](http://www.oekobaudat.de)), so zeigt sich, dass die in den EPDs ausgewiesenen Umweltdaten deutlich unter den Durchschnittswerten liegen (Bild 30).

Hier schlägt sich nieder, dass die in der EPD berücksichtigten Stahlhersteller durch die Standorte in Europa in der Umwelttechnologie führend sind und besonders ressourceneffizient produzieren. Die Umweltdaten für feuerverzinkten Baustahl liegen mindestens 35 % unter den Angaben der ÖKOBAUDAT für unverzinkten Baustahl, bei einzelnen Umweltgrößen sogar noch deutlich darunter. Bei Anwendung der von diesen EPDs abgedeckten Produkte lässt sich also selbst inklusive Feuerverzinkung eine deutlich bessere Umwelleistung erzielen.

Die Feuerverzinkung stellt im Hinblick auf Umweltauswirkungen ihre Eigenschaft als sogenanntes Longerlife-Produkt unter Beweis. Sie hat nur einen geringen Anteil an den Umweltauswirkungen, aber einen großen Einfluss auf die Langlebigkeit des Stahls. Bei den am häufigsten betrachteten Indikatoren, dem Treibhauspotenzial und der Gesamtprimärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) liegt für die Herstellung der Anteil der Feuerverzinkung bei nur 6 bzw. 13 % (Bild 31).

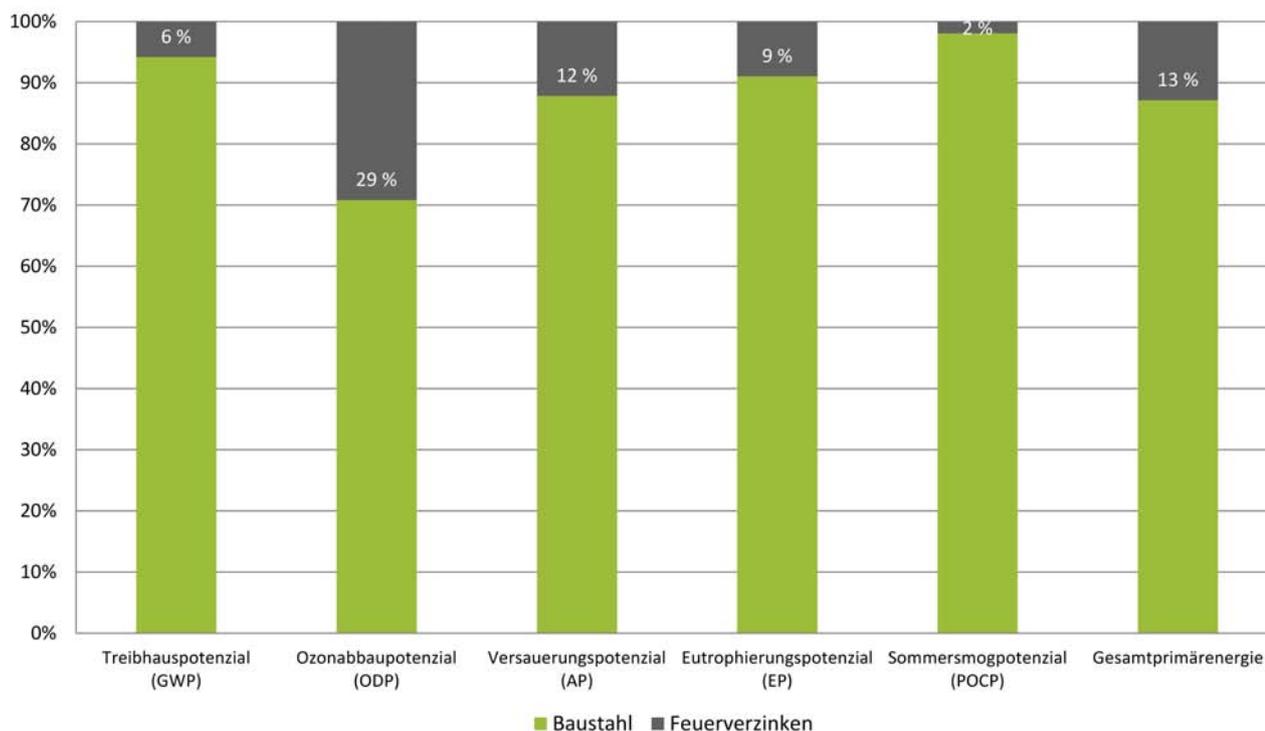


Bild 31: Relative Beiträge von Stahlherstellung und Feuerverzinken zu ausgewählten Wirkungskategorien

## 11 | Zusammenfassung

Die Stückverzinkung stellt ein über viele Jahrzehnte im Stahlhochbau bewährtes Korrosionsschutzverfahren dar, welches aufgrund seiner technischen Vorzüge dauerhafte, wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen in einem breiten Feld von Stahlanwendungen bietet. Aufgrund fehlender Grundlagenkenntnisse zum Verhalten stückverzinkter Elemente unter zyklischer Belastung war bisher eine Anwendung für tragende Komponenten im Brückenbau nicht zulässig. Um diese Wissenslücke zu schließen, wurden in den letzten Jahren vielfältige Untersuchungen zur Klärung der Wirkung einer Zinkschicht auf das Ermüdungsverhalten von Stahlbaudetails durchgeführt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse über die mikroskopischen Vorgänge im Zusammenwirken der Zinkschicht mit dem Stahlgrundwerkstoff als auch über die makroskopischen Auswirkungen auf Konstruktionsdetails wurden entsprechende Ansätze für die statische Bemessung abgeleitet. Weiterhin wurde die Wirksamkeit der Spritzmetallisierung als standardmäßige Korrosionsschutzmethode im Bereich notwendiger Bedarfs-Schweißstöße untersucht und ein Standardverfahren zur Anwendung entworfen. Umfassende Kostenanalysen und eine vergleichende Ökobilanzierung zeigen, dass die Feuerverzinkung insbesondere im Bereich kurzer und mittlerer Spannweiten eine wirtschaftliche und nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Korrosionsschutzsystemen darstellt.

In der vorliegenden Broschüre werden die maßgeblichen Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen zur Anwendung der Feuerverzinkung im Stahl- und Verbundbrückenbau zusammengefasst und praxisgerecht aufbereitet sowie um wesentliche Aspekte der Baupraxis hinsichtlich der Planung, Bemessung und Ausführung verzinkter Brückentragwerke ergänzt. Die notwendigen

Anpassungen im Rahmen der statischen Bemessung sind einfach umzusetzen, die konstruktive Ausbildung der Brückensegmente sowie der notwendigen Bedarfsstöße orientiert sich an für den Konstrukteur bekannten Prinzipien. Gleiches gilt für die stahlbauseitige Fertigung, Montage und Qualitätssicherung auf der Baustelle. In der Broschüre werden hierzu entsprechende praxisnahe Beispiele und Empfehlungen gegeben.

Da es in der Natur der Sache liegt, dass eine Broschüre nicht alle Aspekte und Fragen eines jeden Bauvorhabens abdecken kann und aufgrund der Neuartigkeit des Anwendungsfeldes „Feuerverzinkung im Brückenbau“ mit seinen spezifischen Anforderungen und Eigenarten für Planer, Stahlbau- als auch Verzinkungsbetriebe, wird in allen Projektphasen eine intensive und frühzeitige Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten empfohlen.

Mit den dargestellten Anwendungsregeln und Empfehlungen ist es dem Planer möglich, den Korrosionsschutz des Konstruktionsstahls mittels Feuerverzinkung für die im Brückenbau übliche Nutzungsdauer von 100 Jahren auszulegen. Die dargestellten Ergebnisse und Aussagen zur Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit können als Entscheidungshilfe im Zuge von Neubauplanungen herangezogen werden.

## 12 | Literaturverweise und Dokumente

- [1] Gunreben, Y.-C.  
Brückenertüchtigung - Stand und Ausblick, in BAST  
Expertengespräch Stahlbrückenbau,  
Bergisch Gladbach, 09/2014.
- [2] Kuhlmann, U.; Maier, Ph; Silva, L. da; Gervásio, H.;  
Brett, Ch; Schröter, F.; Willms, R.; Lehnert, T.;  
Popa, N.; Zanon, R.; Orcesi, A.; Ta, N.-B; Thierry, M.;  
Nielsen, K.; Andersen, R.; Knudsen, A.; Barros, P.;  
Perdigão, V.; Martins, N.; Tardivel, Y.; Robe,  
Sustainable steel-composite bridges in built  
environment (SBRI), Brussels, RFCS final report,  
RFSR-CT-2009-00020, 2013.
- [3] Ungermann, D.; Rademacher, D.; Oechsner, M.;  
Landgrebe, R.; Adelmann, J.; Simonsen, F.;  
Friedrich, S.; Lebelt, P.  
Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau,  
IGF-No. 351/ZBG, FOSTA P835, Düsseldorf,  
Forschungsbericht, 2014.
- [4] DIN-Fachbericht 103 "Stahlbrücken", 2009.
- [5] BAST – Bundesanstalt für Straßenwesen  
ZTV-ING Stahlbauten: Zusätzliche Technische  
Vertragsbedingungen und Richtlinien für  
Ingenieurbauten -Teil 4 Abschnitt 3:  
Korrosionsschutz von Stahlbauten (ZTV-ING), 2010.
- [6] BAST – Bundesanstalt für Straßenwesen  
TL/TP-KOR- Stahlbauten: Technische Liefer-  
bedingungen und Technische Prüfvorschriften für  
Beschichtungsstoffe für den Korrosionsschutz von  
Stahlbauten, 12/2002.
- [7] DIN EN ISO 12944-5, Paints and varnishes - Corrosion  
protection of steel structures by protective paint  
systems - Part 5: Protective paint systems, 2008.
- [8] ArcelorMittal Commercial Sections  
Brücken mit Walzprofilen, 2010.
- [9] DIN EN ISO 1461, Hot dip galvanized coatings on  
fabricated iron and steel articles - Specifications and  
test methods, 2009.
- [10] DIN EN ISO 12944-2, Paints and varnishes - Corrosion  
protection of steel structures by protective paint  
systems - Part 2: Classification of environments,  
1998.
- [11] Paul, M.  
Vorlesung über Korrosion und Korrosionsschutz von  
Werkstoffen Teil 1. Wuppertal: TAW-Verlag, 1996.
- [12] Schikorr, G.  
Die Bedeutung des Schwefeldioxyds für die  
atmosphärische Korrosion der Metalle, Materials and  
Corrosion, no. 6, 1964.
- [13] Ungermann, D.; Rademacher, D.; Oechsner, M.;  
Simonsen, F.; Friedrich, S.; Lebelt, P.  
Feuerverzinken im Brückenbau – Teil 2:  
Feuerverzinkung als lebenslanger Korrosionsschutz  
für den Brückenbau, Stahlbau, vol. 84, no. 2,  
pp. 119-123, 2015.
- [14] DIN EN ISO 9224, Corrosion of metals and alloys –  
Corrosivity of atmospheres – Guiding values for the  
corrosivity categories, 2012.
- [15] DIN EN ISO 9223, Corrosion of metals and alloys –  
Corrosivity of atmospheres – Classification,  
determination and estimation, 2012.
- [16] DIN EN ISO 2063, Thermal spraying - Metallic and  
other inorganic coatings - Zinc, aluminium and their  
alloys, 2005.
- [17] DIN EN ISO 8501-3, Preparation of steel substrates  
before application of paints and related products –  
Visual assessment of surface cleanliness – Part 3:  
Preparation grades of welds, edges and other areas  
with surface imperfections, 2007.
- [18] EN 1090-2, Execution of steel structures and  
aluminium structures - Part 2: Technical  
requirements for steel structures, 2011.
- [19] DIN EN ISO 14713, Zinc coatings - Guidelines and  
recommendations for the protection against  
corrosion of iron and steel in structures, 2009.
- [20] EN 1993-1-9, Design of steel structures - Part 1-9 -  
Fatigue, 2010.

- [21] EN 1993-2, Design of steel structures - Part 2 - Steel Bridges, 2010.
- [22] EN 1994-2, Design of composite steel and concrete structures - Part 2: General rules and rules for bridges, 2010.
- [23] EN 10025-2, Hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels, 2005.
- [24] DIN EN ISO 12944-3, Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Part 3: Design considerations, 1998.
- [25] Deutscher Ausschuss für Stahlbau  
DAST-Richtlinie 022, Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen, 2009.
- [26] Pinger, T.  
Zur Vermeidung der Rissbildung an Stahlkonstruktionen beim Feuerverzinken unter besonderer Berücksichtigung der flüssigmetall-induzierten Spannungsrissskorrosion, Diss. RWTH Aachen, 2009.
- [27] EN 10163-2, Delivery requirements for surface conditions of hot-rolled steel plates, wide flats and sections - Part 2: Plate and wide flats, 2005.
- [28] Pinger, T.  
Thermodynamische Effekte beim Feuerverzinken und deren Beherrschung, Konstruktion, pp. 62-67, 6/2013.
- [29] EN 1993-1-10, Design of steel structures - Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties, 2010.
- [30] EN 1993-1-8, Design of steel structures - Part 1-8 - Design of Joints, 2010.
- [31] EN 1993-1-1, Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2010.
- [32] Kammel, C. und Sedlacek, G.  
Dauerverhalten von GV-Verbindungen bei verzinkten Konstruktionen im Freileitungs-, Mast- und Kaminbau, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 409, 2001.
- [33] Valtinat, G.; Albrecht, F.; Dangelmaier, P.  
"Gleitfeste Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlteilen und reibfesten Beschichtungen oder anderen reibbeiwert erhöhenden Maßnahmen", Hamburg, Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (Hrsg.) Bericht 122, 1993.
- [34] Rademacher, D. und Simonsen, F.  
Zum Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsbeanspruchbarkeit im Brückenbau, in 18. DAST-Kolloquium, Aachen, 2012, pp. 119-124.
- [35] Ungermann, D.; Rademacher, D.; Oechsner, M.; Simonsen, F.; Friedrich, S.; Lebelt, P.  
Feuerverzinken im Brückenbau – Teil 1: Zum Einsatz feuerverzinkten Baustahls bei zyklisch beanspruchten Konstruktionen, Stahlbau, vol. 84, no. 1, pp. 2-9, 2015.
- [36] Wentzek, D.  
Wirtschaftlichkeitsvergleich und konstruktive Ausbildung von feuerverzinkten Stahl-Verbundbrücken mittlerer Spannweite, Lehrstuhl Stahlbau, TU Dortmund, Diplomarbeit, 2013.
- [37] DIN EN ISO 8504-2, Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Surface preparation methods - Part 2: Abrasive blast-cleaning, 2002.
- [38] Industrieverband Feuerverzinken e.V.  
Verbände-Richtlinie Korrosionsschutz von Stahlbauten – Duplex-Systeme – Feuerverzinkung plus Beschichtung – Auswahl, Ausführung, Anwendung, 2000.
- [39] DIN 55633, Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Pulver-Beschichtungssysteme – Bewertung der Pulver-Beschichtungssysteme und Ausführung der Beschichtung, 2009.
- [40] Valtinat, G. und Huhn, H.  
Scher-Lochleibungs-Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlbauteilen und gestanzten Löchern unter Betriebsbeanspruchung, Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (Hrsg.) Bericht Nr. 145, 1994.
- [41] DIN EN ISO 2808, Paints and varnishes – Determination of film thickness, 2007.

- [42] DIN EN ISO 2178, Non-magnetic coatings on magnetic substrates - Measurements of coating thickness - Magnetic method, 1995.
- [43] DIN EN ISO 3882, Metallic and other inorganic coatings - Review of methods of measurement of thickness, 2003.
- [44] DIN EN ISO 14922, Thermal spraying - Quality requirements of thermally sprayed structures, 1999.
- [45] DIN EN ISO 14918, Thermal spraying - Approval testing of thermal sprayers, 1999.
- [46] DIN EN ISO 12690, Metallic and other inorganic coatings –Thermal spray coordination – Tasks and responsibilities, 2011.
- [47] Schwär, R.  
Konstruktive Gestaltung von feuerverzinkten Stahl- und Verbundbrücken - Entwicklung von feuerverzinkungsgerechten Konstruktions- und Fertigungsdetails, Lehrstuhl Stahlbau, TU Dortmund, Master-Thesis, 2013.
- [48] Stadie, M.  
Der Einfluss der Feuerverzinkung auf die Dimensionierung der Stahlträger und Details, untersucht an Verbundbrücken mit gewalzten Stahlträgern unter besonderer Berücksichtigung ihrer Wirtschaftlichkeit, Lehrstuhl Stahlbau, TU Dortmund, Master-Thesis, 2015.
- [49] Rebel, A.  
Beschichtungssysteme für den Korrosionsschutz von Brückenbauwerken im Wirtschaftlichkeitsvergleich, TU Dresden, Diplomarbeit, 2014.
- [50] EN 1991-2, Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges, 2010.
- [51] Kuhlmann, U.; Maier, Ph.; Ummenhofer, T.; Zinke, T.; Fischer, M.; Schneider, S.  
Untersuchung zur Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken, Bergisch Gladbach, Schlussbericht BAST-Vorhaben FE 089.0291/2013, 2014.
- [52] Industrieverband Feuerverzinken e.V.  
Special: Nachhaltigkeit", Feuerverzinken, 2008.
- [53] Beck, T.; Fischer, M.; Friedrich, H.; Kaschner, R.; Kuhlmann, U.; Lenz, K.; Maier, P.; Mensinger, M.; Pfaffinger, M.; Sedlbauer, K.; Ummenhofer, T.; Zinke, T.  
Instandhaltungsstrategien als Basis für die ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit, Stahlbau, vol. 1, no. 82, pp. 3-10, 2013.
- [54] ISO 8503-1, Preparation of steel substrates before application of paints and related products- Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates - Part 1: Specifications and definitions for ISO surface profile comparators, 2013.
- [55] EPD-BFS-20130173-IBG1, Umwelt-Produktdeklaration Feuerverzinkte Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche, Institut Bauen und Umwelt (IBU), Berlin, 2013.
- [56] EPD-BFS-20130094-IBG1, Umwelt-Produktdeklaration Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche, Institut Bauen und Umwelt (IBU), Berlin, 2013.



# Unser Schutz ist stärker als Sonne, Wind und Regen

Feuerverzinker machen Werte wetterfest

Denn Stahl ist die Basis für nachhaltiges Bauen – beständig verzinkt für wartungsfreie Stahlbauten mit herausragender Nutzungsdauer.



Stahl – nachhaltig wartungsfrei – für das Parkhaus P58 am Flughafen Frankfurt. Mehr dazu unter: [www.stahlbauverbindet.de](http://www.stahlbauverbindet.de)

Stahlbau verbindet: Menschen, Leben, Generationen



## Mitglieder bauforumstahl .....



## Verbände .....

