

ArcelorMittal Europe - Long Products
Sections and Merchant Bars

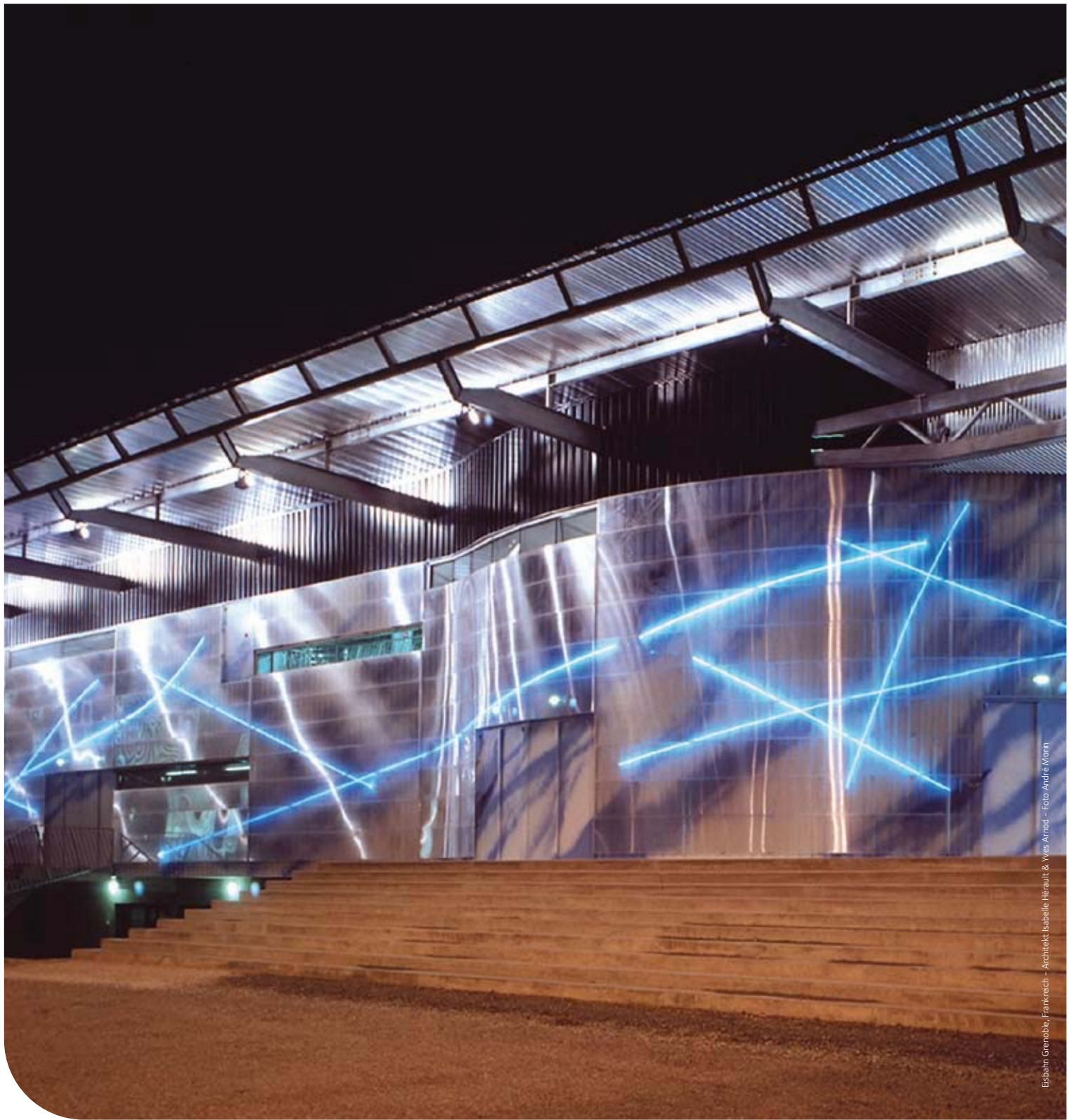


ArcelorMittal

Korrosionsschutz

von Stahlbauten aus Walzprofilen durch Feuerverzinken





Stahl ist ein universell
anwendbarer, wirtschaft-
licher und in hohem Maße
verfügbarer Werkstoff

Inhalt

Vorbemerkungen	3
1. Korrosionsbelastung und Schutzdauer	5
2. Korrosionsschutzverfahren	8
3. Das Feuerverzinken	10
4. Besonderheiten beim Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen	17
5. Anforderungen an die Werkstoffe	21
6. Anforderungen an das feuerverzinkungsgerechte Konstruieren	25
7. Anforderungen an die Fertigung von Stahlkonstruktionen	31
8. Anforderungen an das Feuerverzinkungsverfahren	33
9. Duplex-Systeme	35
10. Wirtschaftlichkeit	37
Referenzen	39
Technische Beratung & Anarbeitung der Träger	42
Ihre Partner	43

Parkhaus Düren, Deutschland

Vorbemerkungen

Stahl ist ein wirtschaftlicher, in hohem Maße verfügbarer, universell anwendbarer und vollständig recyclingfähiger Werkstoff mit hervorragenden physikalisch-mechanischen Eigenschaften. Er zeichnet sich insbesondere durch seine fast unbegrenzte Be- und Verarbeitbarkeit und vollständige Recyclingfähigkeit aus. Das Image dieses Werkstoffes ist aber auch geprägt von seinem Bestreben, mit Bestandteilen der Atmosphäre zu thermodynamisch stabilen Verbindungen – den Oxiden und / oder Salzen des Eisens – zu reagieren.

Diese Eigenschaft des Werkstoffes Stahl, in den natürlichen oder Ausgangszustand zurückzukehren, wird als Korrosion bezeichnet.

Im Volksmund heißt es: Stahl rostet!

Seine Haupteigenschaft, physikalisch-mechanisch beständig zu bleiben oder, auf Stahlbauten übertragen, die Tragfähigkeit zu sichern, bleibt in der Regel über einen langen Zeitraum erhalten. Sie geht erst verloren, wenn sicherheitsrelevante Querschnittsschwächungen durch Korrosion hervorgerufen werden.

Dieser Zeitpunkt ist abhängig von der Geschwindigkeit der ablaufenden Reaktionen zwischen Stahl und seiner Umwelt und diese wiederum von der Art und Konzentration der in ihr enthaltenen korrosiven Bestandteile.

Korrosionsschutz von Stahlbauten ist in diesem Sinne als Eingriff in diesen Reaktionsablauf zu verstehen, mit dem Ziel, die Reaktion zu verhindern bzw. die Geschwindigkeit stark zu reduzieren.

Viele, z. T. über 100 Jahre alte stählerne Bauwerke haben das Leistungsvermögen des Werkstoffes Stahl in Verbindung mit sachgemäßem Korrosionsschutz und Beachtung erforderlicher Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen nachdrücklich bewiesen.

Der erforderliche Aufwand zur Erhaltung dieser Bauwerke ist aus heutiger Sicht allerdings unverträglich hoch.

Auf Stahlkonstruktionen des 21. Jahrhunderts ist die Aussage über aufwändige Erhaltungsmaßnahmen auch bei kritischer Betrachtung nicht mehr zu übertragen.

- Durch konsequent durchgeführte Umweltpolitik auf nationaler und internationaler Ebene hat sich die Belastung der Atmosphäre mit korrosiven Stoffen in den letzten 20 Jahren drastisch verringert. Damit verbunden sind eine deutliche Reduzierung der Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl und Zink und eine Erhöhung der Beständigkeit der Beschichtungssysteme.
- Die konstruktive Gestaltung der Stahlbauten ist durch effektive Schweißverfahren und das breite Angebot von Walzprofilen wesentlich verbessert worden und bringt einen aktiven Beitrag zur Sicherung einer langen Schutzdauer der Korrosionsschutzsysteme.

Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten sind durch deutlich kleinere exponierte Oberflächen und durch bessere Zugänglichkeit weitaus kostengünstiger auszuführen. Die Beständigkeit neuer und weiterentwickelter Beschichtungen ggü. atmosphärischen oder medialen Beanspruchungen ist deutlich verbessert worden. In Verbindung mit neuen Applikationstechniken ermöglichen sie eine kostengünstige Verarbeitung in den Stahlbauwerkstätten und auf der Baustelle.

- Kapazitätserweiterungen und Vergrößerung der Verzinkungsbäder ermöglichen heute das Feuerverzinken von Stahlbauteilen auch größerer Abmessungen in breitem Umfang.
- Die Kombination der Feuerverzinkung mit speziell für Zinküberzüge formulierten Beschichtungssystemen – Duplexsysteme – ist wartungsarmer, in vielen Anwendungsfällen auch wartungsfreier Korrosionsschutz über die Nutzungsdauer von Stahlbauwerken.
- Korrosionsschutz wird in zunehmendem Maße integraler Bestandteil der Stahlbaufertigung.



Hochregallager des Leuchtenherstellers Erco, Lüdenscheid, Deutschland

1. Korrosionsbelastung und Schutzdauer

1. Korrosionsbelastung

Stahlbauteile unterliegen überwiegend einer Korrosionsbelastung aus den atmosphärischen Umgebungsbedingungen.

Art und Größe dieser Korrosionsbelastung sind abhängig von der Befeuchtungsdauer der Stahloberflächen und dem Grad der Verunreinigung der Luft.

Die Befeuchtungsdauer – die Zeit, bei der die relative Luftfeuchtigkeit > 80 % bei > 0 °C Lufttemperatur beträgt – ist der primäre Parameter für die atmosphärische Korrosion bzw. die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl und Zink.

In Abwesenheit von Feuchtigkeit ist die Korrosionsgeschwindigkeit von Eisen und Zink vernachlässigbar klein, auch wenn erhöhte Konzentrationen an gasförmigen

(SO₂, NO_x u. a.) oder festen (Schwebestäube mit aggressiven Bestandteilen) Verunreinigungen vorliegen.

Internationale Forschungs- und Entwicklungsprogramme in Europa haben sich in den letzten Jahren sehr umfangreich mit dem komplexen Einfluss atmosphärischer Verunreinigungen auf die Geschwindigkeit der Korrosion von ungeschütztem Baustahl und Zink beschäftigt [1].

Die Ergebnisse waren Grundlage für die Erarbeitung von ISO 9223 „Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification“. Die dort gegebenen technischen Grundinformationen zur Klassifizierung der Korrosivität der Atmosphäre und den in Abhängigkeit von der Korrosionsbelastung definierten Korrosionsraten für Kohlenstoffstahl, Zink, Kupfer und Aluminium sind für die praktische Beurteilung der Schutzdauer von Beschichtungen und Zinküberzügen hinreichend genau.

Diese Norm war auch Grundlage für die Klassifizierung der Korrosivität der atmosphärischen Umgebungsbedingungen in EN ISO 12944-2.

EN ISO 12944 charakterisiert die atmosphärischen Umgebungsbedingungen in Form von Korrosivitätskategorien auf der Grundlage flächenbezogener Massen- und Dickenverlustangaben für Stahl und Zink im ersten Jahr der Bewitterung (Tabelle 1).

Beispiele typischer Umgebungsbedingungen sollen helfen, die Zuordnung konkreter Bauten in die entsprechende Korrosivitätskategorie als Grundlage für die Festlegung des schutzdauerbezogenen Korrosionsschutzsystems zu erleichtern.

Sonderbelastungen ausgeschlossen, ist für die Mehrzahl der Stahlbauten auf diese Weise eine ausreichend sichere Abschätzung der Korrosionsbelastung möglich.

Tabelle 1 Korrosionsbelastung - Einteilung der Umgebungsbedingungen nach EN ISO 12944-2

Korrosivitätskategorie	Dickenverlust* im 1. Jahr [μm] Zink	Beispiele typischer Umgebungen	
		Freiluft	Innenraum
C 1 unbedenklich	≤ 0.1	–	gedämmte Gebäude; * 60 % rel. Luftfeuchte
C 2 gering	$> 0.1 - 0.7$	gering verunreinigte Atmosphäre, trockenes Klima, z. B. ländliche Bereiche	ungedämmte Gebäude mit zeitw. Kondenswasserbildung, z. B. Lager, Sporthallen
C 3 mäßig	$> 0.7 - 2.1$	Stadt- und Industrielatmosphäre mit mäßiger SO ₂ -Belastung oder gemäßigtetes Küstenklima	Räume mit hoher rel. Luftfeuchte und etwas Verunreinigungen, z. B. Brauereien, Wäschereien, Molkereien
C 4 stark	$> 2.1 - 4.2$	Industrielatmosphäre u. Küstenatmosphäre mit mäßiger Salzbelastung	Schwimmbäder, Chemieanlagen
C 5 sehr stark I	$> 4.2 - 8.4$	Industrielatmosphäre mit hoher relativer Luftfeuchte und aggressiver Atmosphäre	Gebäude oder Bereiche mit nahezu ständiger Kondensation und starker Verunreinigung
C 5 sehr stark M	$> 4.2 - 8.4$	Küsten- u. Offshorebereiche mit hoher Salzbelastung	

* auch als Masseverlust [g/m^2] ausgewiesen



Architekt: Helmuth Jahn - Foto: K. Jüdelmann

In Europa wird national an vielen Messständen die SO_2 -Belastung der Luft bestimmt.

Für die Planung geeigneter Korrosionsschutzsysteme sind auf diese Weise erhaltene SO_2 -Belastungswerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] in Verbindung mit EN ISO 12944-2 nicht direkt zur Ermittlung der entsprechenden Korrosivitätskategorie zu verwenden.

Im Rahmen o. g. europäischer Forschungen wurde jedoch auch der Zusammenhang Korrosionsrate von Zink, SO_2 -Belastung der Luft und Befeuchtungsdauer / Niederschlagsmenge untersucht [2].

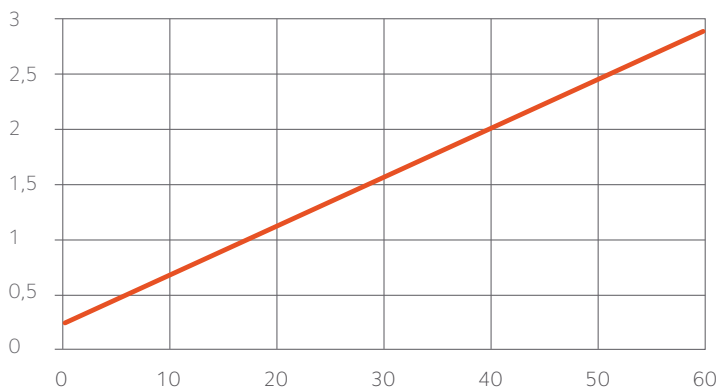
Die aus diesen Untersuchungen resultierende grafische Darstellung des Zinkverlustes in Abhängigkeit von der SO_2 -Konzentration der Luft – Bild 1 zeigt eine vereinfachte aber praktisch gut handhabbare Version – ermöglicht es, aus zugänglichen Werten der SO_2 -Belastung [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] bestimmter Standorte die Korrosivitätskategorie nach EN ISO 12944-2 zu ermitteln.

Es soll jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die auf diese Weise bestimmte Korrosivitätskategorie die makroklimatisch wirkende Korrosionsbelastung charakterisiert. Mikroklimatische Besonderheiten, die sich z. B. aus unmittelbar in der Nähe der Stahlbauten befindlichen Emissionsquellen für korrosiv wirksame Stoffe oder auch durch nicht korrosionsschutzgerechte Gestaltung von Stahlbauteilen ergeben können, werden so nicht erfasst und müssen vom Auftraggeber, z. B. chemische Industrie, erfragt werden.

Die Korrosionsbelastung ist in Europa mit dem deutlichen Absinken des SO_2 -Gehaltes der Luft drastisch geringer geworden. Die durchschnittliche jährliche Zinkkorrosionsrate wird für 1992/93 mit $8 \text{ g}/\text{m}^2$ bzw. $1,1 \mu\text{m}$ angegeben [3]. Diese Werte sind auch heute noch als repräsentativ anzusehen.

Bild 1 Zinkabtrag in Abhängigkeit von SO_2 -Belastung (nach Knotkova/Porter)

Zinkabtrag/Jahr [μm]



Jahresdurchschnittswert Schwefeldioxid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Santiago-Bernabéu-Stadion, Madrid, Spanien



2. Schutzdauer

Die Schutzdauer wird in EN ISO 12944-1 für Beschichtungen als die erwartete Standzeit des Beschichtungssystems bis zur ersten Instandsetzung definiert.

Für Zinküberzüge definiert EN ISO 14713 die Schutzdauer bis zur ersten Instandsetzung als das Zeitintervall zwischen der Herstellung eines ersten Überzuges und seiner ersten Instandsetzung, um den Schutz des Grundwerkstoffes sicherzustellen.

Die Schutzdauer ist ein wichtiger Parameter für die Auswahl und Festlegung von Korrosionsschutzsystemen. Sie ist ein technischer Begriff, der dem Auftraggeber helfen kann, ein Instandsetzungsprogramm festzulegen.

Schutzdauer ist keine Gewährleistungszeit. Die Gewährleistungszeit – ein juristischer Begriff – ist im Allgemeinen kürzer als die Schutzdauer. Regeln, die beide Begriffe miteinander verbinden, gibt es nicht.

Wartungsfreier bzw. wartungsarmer Korrosionsschutz für den Zeitraum der gesamten Nutzungsdauer ist für feuerverzinkte Stahlbauteile auch bei Freibwitterung heute kein Wunschtraum mehr.

Die Schutzdauer des Zinküberzuges ist bei gegebener Korrosionsbelastung im Wesentlichen abhängig von der Schichtdicke. In Bild 2 ist auf der Grundlage des in Tabelle 1 angegebenen Dickenverlustes von Zink der Zusammenhang Schutzdauer / Zinkschichtdicke in Abhängigkeit von der Korrosionsbelastung grafisch dargestellt.

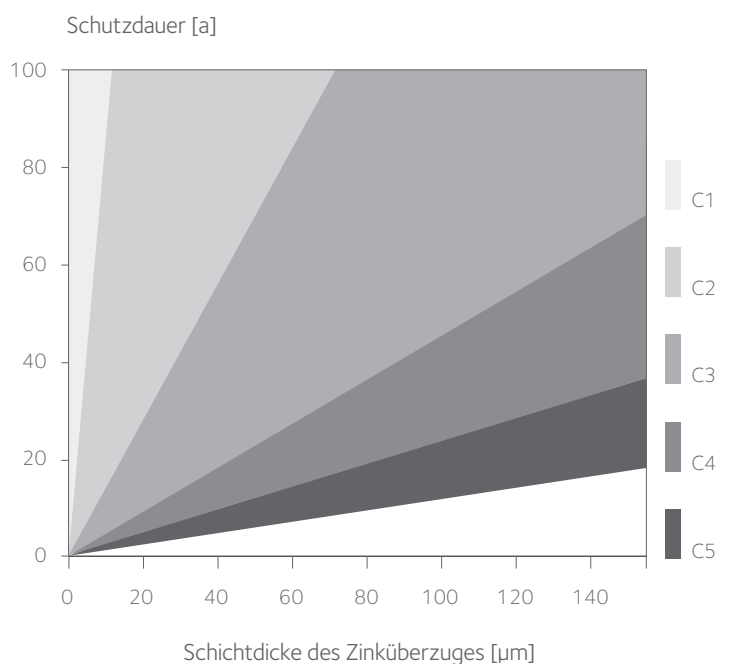
Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass der Zinkabtrag flächig erfolgt. Geht man von der in Europa heute wirksamen makroklimatischen Korrosionsbelastung der Korrosivitätskategorie C 3 aus, gekennzeichnet durch einen Zinkabtrag von 0,7 bis 2,1 μm im Jahr, errechnet sich für die in EN ISO 1461 festgelegte Zinkschichtdicke (Tabelle 3) von mindestens 85 μm für ≥ 6 mm Stahldicke eine Schutzdauer von mindestens 40 Jahren.

Auch hier muss noch einmal darauf verwiesen werden, dass die auf o. g. Weise errechnete Schutzdauer nur für die makroklimatisch wirksame Korrosionsbelastung gilt.

Mikroklimatische Besonderheiten oder auch konstruktionsbedingte höhere Belastungen, z. B. Schmutzansammlungen und damit verbundene längere Befeuchtungsdauer u. a., können zu einer deutlich geringeren Schutzdauer führen.

Mit eindeutig definierten atmosphärischen Umgebungsbedingungen – Korrosivitätskategorien – und der Zugriffsmöglichkeit zu Messwerten für deren Ermittlung in Verbindung mit der Schutzdauer ist heute eine sachgemäße Planung geeigneter Korrosionsschutzsysteme nach EN ISO 12944-5 bzw. EN ISO 1461 sicher möglich.

Bild 2 Schutzdauer von Zinküberzügen in Abhängigkeit von der Schichtdicke und der Korrosionsbelastung



2. Korrosionsschutzverfahren



Stiftung Cognac-Jay, Rueil-Malmaison, Frankreich



Man unterscheidet im Korrosionsschutz von Stahlkonstruktionen aktive und passive Schutzmaßnahmen.

Aktiver Korrosionsschutz ist Vermeidung der Korrosion oder Minderung der Geschwindigkeit der Korrosionsreaktion durch

- Eingriff in den Korrosionsvorgang, z. B. Reduzierung der Umweltbelastungen
- Werkstoffauswahl
- korrosionsschutzgerechte Gestaltung der Stahlkonstruktionen

Das Ziel passiver Schutzmaßnahmen ist das Fernhalten korrosiv wirkender Medien von der Stahloberfläche.

Im Korrosionsschutz von Stahlkonstruktionen dominieren aufgrund ihrer breiten Anwendbarkeit und Leistungsfähigkeit folgende passive Korrosionsschutzverfahren:

- Beschichtungssysteme, hergestellt aus Flüssig- oder Pulverbeschichtungsstoffen
- Aufbringen von metallischen Überzügen (Zink, Aluminium oder auch Zink-/Aluminiumlegierungen) durch Schmelztauchverfahren, z. B. Feuerverzinken oder thermische Spritzverfahren, z. B. Spritzverzinken
- Kombination metallischer Überzüge mit Beschichtungen/Beschichtungssystemen

Optimaler Korrosionsschutz wird durch Kombination aktiver und passiver Korrosionsschutzverfahren erreicht, wobei die korrosionsschutzgerechte Gestaltung der Stahlkonstruktionen vor der Durchführung passiver Korrosionsschutzmaßnahmen ausnahmslos immer erforderlich ist.

Im Folgenden wird auf das für den Korrosionsschutz von Stahlkonstruktionen wirksamste passive Verfahren, das Feuerverzinken, und damit in Verbindung stehende verfahrensspezifische Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften und die konstruktive Gestaltung sowie Fertigung der Stahlkonstruktionen eingegangen.

3. Das Feuerverzinken





1. Verfahren

Unter Feuerverzinken versteht man das Herstellen von Überzügen aus Zink bzw. Eisen-Zink-Legierungen durch Eintauchen von vorbereitetem Stahl oder Guss in geschmolzenes Zink.

Es wird unterschieden zwischen

- kontinuierlichen Verfahren (für Bandstahl, Draht u. a.),
- diskontinuierlichen Verfahren (für abgelenkte Profile, Konstruktions- und Kleinteile).

Für Stahlkonstruktionen kann nur das diskontinuierliche Verfahren, das sogenannte Stückverzinken nach EN ISO 1461, angewendet werden.

Voraussetzung für das Feuerverzinken, also für die Eisen-Zink-Reaktion, ist eine metallisch reine, d. h. fett-, rost- und zunderfreie Stahloberfläche des Verzinkungsgutes.

Diesen hohen Grad der Oberflächenvorbereitung – Vorbereitungsgrad Be nach EN ISO 12944-4 – erreicht man durch Vorbehandlung des Verzinkungsgutes in sauren oder alkalischen Entfettungsbädern und durch Beizen in verdünnter Salzsäure mit anschließender Flussmittelbehandlung. Flussmittel, meist eine Mischung von Zinkchlorid mit Ammonium-/Alkalichloriden, bewirken beim Eintauchen des Verzinkungsgutes in die Zinkschmelze (ca. 440 bis 460 °C) eine Feinreinigung der Stahloberfläche und erhöhen deren Benetzungsvermögen gegenüber der Zinkschmelze.

Die Zinkschmelze besteht aus Zink, dessen Begleitelemente (mit Ausnahme von Eisen und Zinn) die Summe von 1,5 % nicht übersteigen dürfen.

Das gereinigte und gefluxte Verzinkungsgut kann in einem Trockenofen bei einer Temperatur von 80 ÷ 100 °C getrocknet werden.

Während der Verweilzeit (Tauchdauer) des Verzinkungsgutes in der Zinkschmelze bilden sich auf der Stahloberfläche Eisen-

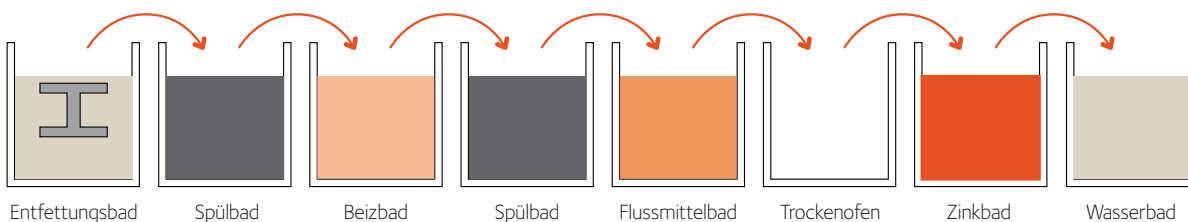
Zink-Legierungsschichten, über die sich beim Herausziehen aus der Zinkschmelze eine Reinzinkschicht legt.

In Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Stähle, insbesondere des Si- und P-Gehaltes, findet die Eisen-Zink-Reaktion unterschiedlich schnell statt. So genannte reaktive Stähle mit hoher Geschwindigkeit der Eisen-Zink-Reaktion bilden relativ dicke Eisen-Zink-Legierungsschichten und durch die Restwärme des Verzinkungsgutes nach dem Herausziehen aus der Zinkschmelze kann selbst die Reinzinkschicht noch in Eisen-Zink-Legierungsschicht umgewandelt werden.

Diese Reaktion kann durch sofortiges Abschrecken des Verzinkungsgutes in einem Wasserbad unterbunden bzw. stark verlangsamt werden.

In Bild 3 ist der Verfahrensablauf des Stückverzinkens schematisch dargestellt.

Bild 3 Verfahrensablauf der Stückverzinkung



2. Die Eisen-Zink-Reaktion

Die heute gängigen Baustahlsorten sind grundsätzlich alle feuerverzinkungsfähig.

Allerdings weisen sie arttypische Besonderheiten auf, die sich auf das Ergebnis des Feuerverzinkens auswirken.

Feuerverzinken ist eine Reaktion der Stahloberfläche mit der Zinkschmelze. Das Ergebnis dieser Reaktion ist der Zinküberzug. Dicke und Aussehen des Zinküberzugs sind in entscheidendem Maße von der chemischen Zusammensetzung der Stähle und den Verzinkungsbedingungen (Schmelztemperatur, Tauchdauer) abhängig. Auch die Topografie der Stahloberfläche, wie z. B. Ziehriefen kaltgewalzter Rohre oder Profile, können das Ergebnis des Verzinkens beeinflussen.

Nach dem Si+P-Gehalt kann man das Verzinkungsverhalten der Stähle in vier Hauptgruppen unterteilen (Tabelle 2).

Mit einem Siliziumgehalt zwischen 0,15 bis 0,25 % und einem Phosphorgehalt unter 0,040 % reihen sich die Güten der ArcelorMittal-Langprodukte in die Gruppe der Sebisty-Stähle ein.

Die Übergänge zwischen den Gruppen sind fließend und von der Temperatur der Zinkschmelze abhängig. Insbesondere bei Stählen im Übergangsbereich von der Gruppe der Si+P-armen Stähle zur Sandelin-Gruppe beeinflusst die Topografie der Stahloberfläche die Eisen-Zink-Reaktion erheblich. Dadurch kann es zu vollflächigen Abweichungen in der Dicke und im Aussehen des Zinküberzuges kommen oder aber auch nur zu örtlichen Abweichungen, sodass Eigenschaften beider Gruppen nebeneinander vorliegen.

Ähnliche Erscheinungen können auch durch örtliche thermische Beanspruchungen der Stahloberfläche hervorgerufen werden, wie z. B. beim Brennschneiden oder auch beim Warmrichten. Ursachen dafür sind vermutlich örtliche Veränderungen der chemischen Zusammensetzung durch Oxidation sogenannter reaktiver Elemente des Stahles (Si, P) im wärmebeeinflussten oberflächennahen Bereich, die damit ihren Einfluss auf die Eisen-Zink-Reaktion verlieren.

Unterschiedliches Verzinkungsverhalten von Schweißnähten ggü. den benachbarten Stahloberflächen ist auf die durch die Schweißzusatzwerkstoffe bedingte veränderte chemische Zusammensetzung der Schweißnaht zurückzuführen. Vor dem Verzinken plangeschliffene Schweißnähte können dadurch bedingt einen dickeren und auch anders aussehenden Zinküberzug aufweisen und sich erneut von den benachbarten Bereichen deutlich unterscheiden.

Vor dem Verzinken gestrahlte Oberflächen, z. B. durch Schleuderrad- oder Druckluftstrahlen, reagieren mit schmelzflüssigem Zink in der Regel mit größerer Reaktionsgeschwindigkeit. Dadurch entstehen ggü. nur gebeizten Stahloberflächen dickere Zinküberzüge.

Unebenheiten und Unregelmäßigkeiten der Stahloberfläche, z. B. durch Walzen, Richten u. ä. hervorgerufen, werden durch den Zinküberzug im Allgemeinen nicht egalisiert. Meistens kommt es zu einer optischen Verstärkung solcher Effekte.

Die Möglichkeiten der Feuerverzinkerei, das durch die chemische Zusammensetzung der Stähle bedingte Verzinkungsverhalten zu beeinflussen, sind nur sehr gering.

Prinzipiell ist es z. B. möglich, die Abhängigkeit der Schichtdicke von Zinküberzügen von der Zinkschmelztemperatur und Tauchdauer zur Schichtdickensteuerung zu nutzen, doch ergibt sich, wie in Bild 4 zu sehen, hierfür kein einheitliches Bild.

Die Schichtdicke wächst mit zunehmender Temperatur bis ca. 0,12 % Si+P-Gehalt, danach bis ca. 0,27 % Si+P-Gehalt kehrt sich die Abhängigkeit um, d. h. bei Stählen der Sebisty-Gruppe nimmt die Zinküberzugsdicke mit zunehmender Temperatur ab, um ab ca. 0,27 % Si+P-Gehalt wieder normal von der

Tabelle 2 Klassifizierung des Verzinkungsverhaltens von Baustählen nach dem Silizium + Phosphor-Gehalt

Gruppe	Silizium + Phosphor [%]	Zinküberzug
1 Si+P-arme Stähle	< 0.03	Silbrig glänzend, Zinkblume, niedrige Schichtdicke
2 Sandelin-Stähle	0.03 ÷ < 0.13	Grau, z. T. grießig, hohe Schichtdicke
3 Sebisty-Stähle	0.13 ÷ < 0.28	Silbrig-glänzend bis mattgrau, mittlere Schichtdicke
4 Si+P-reiche Stähle	≥ 0.28	Mattgrau, hohe Schichtdicke

Zinkschmelztemperatur abhängig zu sein, d. h. die Schichtdicke wird mit zunehmender Zinkschmelztemperatur wieder größer.

Das ist auch der Grund dafür, dass in der EN ISO 1461 nur Mindestwerte für die örtliche und durchschnittliche Schichtdicke angegeben werden (Tabelle 3). Eine obere Begrenzung der Schichtdicke wird nicht vorgenommen.

In der Praxis bedeutet das, dass die Feuerverzinkerei die chemische

Zusammensetzung des Verzinkungsgutes kennen muss, um über die Temperatur Einfluss nehmen zu können und diese Zusammensetzung muss über einen längeren Zeitraum konstant bleiben. Temperaturveränderungen der Zinkschmelze sind technisch und wirtschaftlich nur für längere Zeitintervalle realisierbar.

Werden spezielle Anforderungen an die Schichtdicke oder das Aussehen der Zinküberzüge gestellt, die über die allgemeinen Qualitätsanforderungen an Zinküberzüge

nach EN ISO 1461 hinausgehen, z. B. silbrig glänzende Zinküberzüge, wie sie allgemein für die Anwendung der Feuerverzinkung unter gestalterischen Gesichtspunkten gewünscht werden, müssen besondere Voraussetzungen bezüglich einheitlicher Werkstoffwahl, Konstruktion und Fertigung erfüllt sein. Eine Abstimmung mit der Feuerverzinkerei ist unerlässlich.

Eine aktive Beeinflussung der Eisen-/Zinkreaktion, d. h. Eliminierung oder zumindest Reduzierung des Einflusses der chemischen Zusammensetzung der Stähle auf das Verzinkungsergebnis ist durch Zulegieren von geringen Anteilen von z. B. Sn, Ni, Bi, Al zur Zinkschmelze möglich. Auf daraus resultierende Folgen wird in den Abschnitten 4 bis 8 eingegangen.

Bild 4 Abhängigkeit der Zinküberzugsdicke vom Si+P-Gehalt der Stähle und von der Zinkschmelztemperatur bei einer Tauchdauer von 10 min [4]

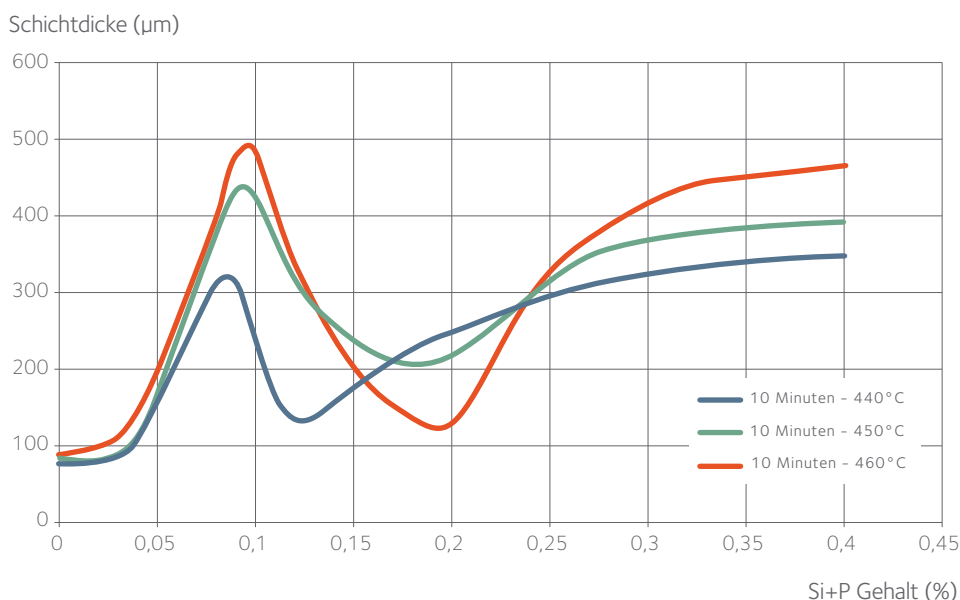


Tabelle 3 Dicke von Zinküberzügen in Abhängigkeit von der Materialdicke nach EN ISO 1461

Materialdicke	Örtliche Schichtdicke (Mindestwert) [µm]	Durchschnittliche Schichtdicke (Mindestwert) [µm]
$t \geq 6 \text{ mm}$	70	85
$t \geq 3 \text{ mm und } < 6 \text{ mm}$	55	70

3. Haftvermögen von Zinküberzügen

EN ISO 1461 enthält die Aussage, dass das Haftvermögen zwischen dem Zinküberzug und dem Grundwerkstoff üblicherweise nicht geprüft werden muss, da Zinküberzüge ein hinreichendes Haftvermögen besitzen und den mechanischen Beanspruchungen bei üblichem Handling und üblichem Gebrauch widerstehen, ohne sich abzulösen oder abzublättern.

Sollte eine Prüfung des Haftvermögens, z. B. für Werkstücke, die einer hohen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt sind, notwendig sein, wird auf Schlag- oder Schnittprüfungen verwiesen.

Eine geltende europäische Norm für die Prüfung des Haftvermögens existiert jedoch nicht.

Die gängigen Methoden, wie Kreuzschnitt-Test, ASTM-Gelenkkammer-Test (ASTM A 123) oder auch Prüfung nach DIN 50978 mit einem unter Federspannung stehenden Schlagbär, sind auf Schichtdicken $\leq 150 \mu\text{m}$ begrenzt und geben auch nur qualitative Aussagen. Methodisch bedingt wird bei o. g. Verfahren jedoch eher die Duktilität von Zinküberzügen getestet als deren Haftvermögen.

Durch Modifizierung des Prüfverfahrens für organische Beschichtungen „Abreißversuch zur Beurteilung der Haftfestigkeit nach EN ISO 4624“ [5] ist es möglich, auch mit diesem Prüfverfahren die Haftfestigkeit von Zinküberzügen mit ausreichender statistischer Sicherheit bis $\leq 45 \text{ MPa}$ zu ermitteln.

Diese Haftfestigkeitskennwerte sind ein Maß für die Zug- bzw. Abhebefestigkeit der Zinküberzüge und in Verbindung mit den Bruchbildern (Adhäsions- oder Kohäsionsbrüche) eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung des Haftvermögens von Zinküberzügen.

Die Durchschnittswerte für die Haftfestigkeit für Zinküberzüge nach EN ISO 1461 liegen mit Ausnahme für Sebisty-Stähle generell über 20 MPa. Für Sebisty-Stähle werden 10 bis 18 MPa ermittelt.

Die in EN ISO 1461 getroffene Aussage, dass eine ausreichende Haftung für fehlerfreie Zinküberzüge typisch ist, konnte durch entsprechende Untersuchungen [6] bestätigt werden.



4. Ausbesserung von Beschädigungen im Zinküberzug

Zinküberzüge dürfen nach EN ISO 1461 Fehlstellen aufweisen, die in ihrer Summe nicht mehr als 0,5 % der Bauteiloberfläche betragen. Eine Einzelfehlstelle darf nicht größer als maximal 10 cm² sein und muss sachgemäß ausgebessert werden.

Bei nicht begehbaren Hohlkonstruktionen sind die Innenoberflächen aus der Fehlstellenregelung ausgenommen, weil sie kaum oder nicht zu kontrollieren sind und mangels Zugänglichkeit auch nicht fachgerecht ausgebessert werden können.

Die Norm lässt als Ausbesserungsverfahren drei verschiedene Möglichkeiten gleichrangig zu:

- Thermisches Spritzen mit Zink
- Zinkstaubbeschichtungen
- Lote auf Zinkbasis

Eine Rangfolge im Hinblick auf die Anwendung der Ausbesserungsverfahren wird nicht gegeben.

Die Auswahl des Ausbesserungsverfahrens erfolgt durch das Feuerverzinkungsunternehmen, wenn keine anderen Vereinbarungen getroffen werden.

Das Feuerverzinkungsunternehmen muss den Auftraggeber bzw. Endverbraucher über das verwendete Ausbesserungsverfahren informieren. Branchenüblich ist das Ausbessern mit Hilfe geeigneter Zinkstaubbeschichtungsstoffe. Vorteilhaft ist die Verwendung von 1-Komponenten-Polyurethan-Zinkstaub-Grundbeschichtungen, deren Eignung durch den Stoffhersteller nachzuweisen ist. Dieses Ausbesserungsverfahren ist praktikabel, bei sachgerechter Anwendung gut wirksam und bietet mit vertretbarem Aufwand eine brauchbare Lösung.

Das Ausbessern von Fehlstellen durch thermisches Spritzen mit Zink (mit oder ohne anschließende Versiegelung) ist zwar das aufwändigste und teuerste Ausbesserungsverfahren, die Schutzdauer der ausgebesserten Fehlstelle stimmt jedoch mit der des intakten Zinküberzuges überein. Wird dieses Ausbesserungsverfahren gewünscht, ist die technische Machbarkeit, insbesondere im Hinblick auf die Zugänglichkeit der betreffenden Stellen zu klären, außerdem sind Vereinbarungen über den zusätzlichen Kostenaufwand zu treffen.

Die Ausbesserung mit geeigneten Zinkstaubgrundbeschichtungsstoffen besitzt ebenfalls eine gute Wirksamkeit, allerdings hängt die Qualität der Ausbesserung in hohem Maße von der Vorbereitung der Oberfläche, der Eignung des Beschichtungsstoffes, seiner Applikation und der Dicke der Beschichtung ab.

Die Ausbesserung mit Loten auf Zinkbasis ist relativ aufwändig und das erreichbare Ergebnis ist in der Regel nicht befriedigend. Insbesondere niedrig schmelzende zinnhaltige Lote liefern schlechte Ergebnisse. Daher sind Lote als Ausbesserung nur noch selten anzutreffen.

Besonderheiten bei der Art der Ausbesserung im Zusammenhang mit dem Aufbringen nachfolgender Beschichtungen müssen beachtet werden. Insbesondere die „Verträglichkeit“ der Ausbesserungsbeschichtung mit den nachfolgenden Beschichtungen muss sichergestellt sein. Bei nachfolgender Pulverbeschichtung sind zusätzlich die bei diesem Verfahren auftretenden „Einbrenntemperaturen“ von bis zu 200 °C zu beachten.

Vor dem Auftragen einer Ausbesserungsschicht ist die Fehlstelle zu reinigen und ggf. zu entrostern. Durch ein von Hand ausgeführtes partielles maschinelles Schleifen zum Oberflächenvorbereitungsgrad PMA

bzw. ein Strahlen der Schadstelle zum Oberflächenvorbereitungsgrad Sa 2 ½ nach EN ISO 12944-4 lässt sich die Oberfläche der Fehlstelle in einer hochwertigen Qualität vorbereiten. Auf Anforderungen an die Rauheit der Oberfläche in Abhängigkeit von der Art der Ausbesserung ist zu achten.

Die Schichtdicke des ausgebesserten Bereiches muss mindestens 30 µm mehr betragen als die geforderte örtliche Schichtdicke des Zinküberzuges gemäß Tabelle 3.

Bei Fehlstellen im Zinküberzug, die durch Dritte im Rahmen der Weiterverarbeitung oder Montage entstehen, soll nach dieser Norm analog verfahren werden. Zinküberzüge sind gegenüber mechanischen Belastungen besser beständig als organische Beschichtungen. Dennoch sind örtlich begrenzte Fehlstellen bzw. Schichtdickenunterschreitungen an den Angriffspunkten der Hebezeuge selbst bei größter Sorgfalt technisch nicht zu vermeiden.

Durch ggf. erforderliche stahlbautechnische Änderungen an feuerverzinkten Konstruktionen oder auch mechanischen Überbeanspruchungen während der Montage können Fehlstellen verursacht werden, die in der Regel eine Fläche von 10 cm² überschreiten. Kann die Fehlstelle so ausgebessert werden, dass der Korrosionsschutzwert der Konstruktion nicht beeinträchtigt wird, z. B. durch thermisches Spritzen mit Zink, ist die Forderung nach Demontage und Neuverzinkung unangemessen.

Es sollte wie auch für Fehlstellen im Verantwortungsbereich des Feuerverzinkungsunternehmens, im Rahmen einer Interessenabwägung nach einer einvernehmlichen Lösung zwischen den Vertragspartnern gesucht werden.



Handelskammer Luxemburg

4. Besonderheiten beim Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen

1. Vorbemerkungen

Feuerverzinken ist ein hochwirksames und wirtschaftliches Korrosionsschutzverfahren für Stahlkonstruktionen.

Das Feuerverzinken stellt jedoch verfahrensbedingt (Oberflächenvorbehandlung durch Beizen mit Säuren, Tauchen der Stahlkonstruktionen in eine Metallschmelze bei ca. 450 °C, Temperaturgradient in der Stahlkonstruktion während der Eintauchphase) im Vergleich zu anderen Korrosionsschutzverfahren höhere Anforderungen an

- Stahlgüte und Materialeigenschaften
- Planung, konstruktive Gestaltung
- Fertigung der Stahlkonstruktionen

was bei seiner Anwendung von allen Beteiligten beachtet werden muss. In der Tat besteht bei ungünstiger Kombination dieser Faktoren in der Folge des Feuerverzinkens oder der Behandlung der Stahlbauteile in den wässrigen Verfahrenslösungen wie Entfettung, Beize und Flussmittel die Gefahr der Rissbildung. Hierbei ist zu bemerken, dass nach heutigem Erkenntnisstand die chemische Zusammensetzung des Zinkbades als Leiteinwirkung der Rissbildung betrachtet wird, wobei Legierungen mit erhöhter Reaktivität das Gefährdungspotential erhöhen.

Beim Feuerverzinken ist ganz allgemein zu unterscheiden zwischen der Flüssigmetall induzierten Spannungsrisskorrosion (Liquid Metal induced Embrittlement = LME) und der Wasserstoff induzierten Rissbildung/-erweiterung (Wasserstoffversprödung).

Umfangreiche metallografische Untersuchungen haben gezeigt, dass beim Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen in den üblichen

Baustählen die Rissbildung auf LME zurückzuführen ist. Demgegenüber wird der Wasserstoffversprödung beim Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen eine deutlich geringere Bedeutung beigemessen [7].

Zur Erreichung der in EN ISO 1461 an die Qualität des Zinküberzuges gestellten Anforderungen ist – insbesondere bei schweißintensiven Stahlkonstruktionen – eine enge Zusammenarbeit von Stahlhersteller, Stahlbauer und Feuerverzinker unbedingt erforderlich.

2. Wasserstoffversprödung

Die Aufnahme von Wasserstoff durch Metalle erfolgt prinzipiell bei ausreichendem äußeren Wasserstoffangebot, z. B. während der Stahlherstellung (Schmelz- und Giessprozess), Stahlverarbeitung (Schweißen) oder auch bei Oberflächenvorbehandlungsprozessen, wie Entfetten, Beizen u. a.

Nach ISO 4964 ist die Gefahr der Wasserstoff induzierten Rissbildung insbesondere dann gegeben, wenn die örtlich tatsächlich vorhandene Zugfestigkeit $> 1200 \text{ N/mm}^2$, die Härte $> 34 \text{ HRC}$ oder die Oberflächenhärte $> 340 \text{ HV}$ sind. Kerben, die durch die Oberflächenfeingestalt gegeben sind, oder Werkstoffinhomogenitäten erhöhen das Schadensrisiko.

Gewöhnliche Baustähle verspröden normalerweise nicht durch die Aufnahme von Wasserstoff beim Beizen, selbst wenn Wasserstoff im Stahl verbleiben sollte. Bei derartigen Stählen entweicht der Wasserstoff während des Tauchvorganges im schmelzflüssigen Zink.



Architekt: Albanie Architectes - Foto: P. Rogeaux-Carlier

3. Flüssigmetall induzierte Spannungsrissskorrosion (Liquid Metal Embrittlement - LME)

Voraussetzungen für das Auftreten von LME sind:

- ausreichende statische oder dynamische Zug-, Biege- oder Torsionsspannung (Last- /Eigenspannungen)
- korrosiv wirkendes Flüssigmetall
- gegenüber LME anfälliges Festmetall
- kritisches Temperaturintervall
- gegenseitige Löslichkeit der Metalle der kritischen Paarung
- gute Benetzbarkeit des festen Metalls durch das flüssige Metall
- Bildung nicht zu hoch schmelzender intermetallischer Phasen/Verbindungen

Sind oben genannte Bedingungen beim Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen gegeben, können durch Benetzung oberflächennaher Korngrenzen bzw. Flächen in Kerben oder Anrissen mit einem korrosiv wirkenden Flüssigmetall, Zink und/oder Legierungsbestandteilen der Zinkschmelze wie z.B. Blei, Zinn oder Wismut, die Eigenschaften des Werkstoffes Stahl nachteilig beeinflusst werden.

Durch

- Verminderung des Formänderungsvermögens (Dehnbarkeit), siehe auch Bild 6,
- Herabsetzung des Widerstandes gegen Rissausbreitung

können Zugspannungen nicht mehr übertragen werden. Bei Überschreitung einer kritischen Spannung (Grenzspannung) entstehen in der Folge davon interkristallin verlaufende Risse im Stahl, verästelt oder verzweigt in den Werkstoff hinein laufend, bis der restliche Querschnitt durch Gewaltbruch zerstört wird. Die Rissspitzen sind meist mit Zink – bei „legierten“ Zinkschmelzen zusätzlich mit erhöhten Konzentrationen der Legierungselemente – gefüllt.

Die Größe der kritischen Spannung oberhalb der Stahl in Zinkschmelzen hinsichtlich Rissbildung durch LME gefährdet ist, ist derzeit noch weitgehend unbekannt. Das liegt einmal an der Schwierigkeit, die in einem Werkstück vorliegenden oder angreifenden Spannungen zu definieren und zu messen und ist zum anderen darin begründet, dass auch durch technologische Parameter beim Feuerverzinken, insbesondere durch die Höhe der Eintauchgeschwindigkeit der Bauteile in die Zinkschmelze und die Größe des Wärmeübergangs Schmelze/ Bauteil, Spannungen erzeugt werden, deren Berücksichtigung bei theoretischen Deutungen

außerordentlich schwer ist. Allgemein anerkannt wird in der Literatur, dass mit steigender Härte und Festigkeit bei Baustählen die LME-Anfälligkeit größer wird. Diesbezügliche Feststellungen besagen, dass bei Güten S275 und darunter nur eine geringe LME-Gefahr besteht, die oberhalb S460 deutlich größer wird.

Mit großer Wahrscheinlichkeit kann heute auch davon ausgegangen werden, dass die chemische Zusammensetzung der Zinkschmelze, insbesondere hinsichtlich der Gehalte an Blei, Zinn und Wismut, das Gefährdungspotenzial hinsichtlich Rissbildung durch LME nachhaltig beeinflusst. In Kapitel 8 werden typische Grenzwerte für diese 3 Legierungselemente gegeben.

5. Anforderungen an die Werkstoffe



1. Chemische Zusammensetzung

Für die Baustähle der ArcelorMittal Langprodukte kann im Rahmen der Teile 2 und 4 der Norm EN 10025:2004 die Anforderung „Eignung zum Feuerverzinken“ für Stahlgüten bis zu einer Streckgrenze von 460 MPa vereinbart werden. Darunter ist allerdings lediglich die Auswirkung der chemischen Zusammensetzung der Stähle hinsichtlich Silizium- und Phosphorgehalt auf die Dicke und das Aussehen des Zinküberzuges zu verstehen.

Das Verhalten der Stähle beim Feuerverzinken hinsichtlich LME-Gefährdungspotenzial in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung ist in europäischen Normen nicht geregelt.

Umfangreiche Untersuchungen dazu wurden insbesondere in Japan durchgeführt, bei denen ähnlich wie beim Kohlenstoffäquivalent als Maß für die Schweißseignung ein Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung der Stähle und ihres LME-Gefährdungspotenzials festgestellt wurde. In [9] wird im Rahmen eines Beitrages zum derzeitigen Kenntnisstand bezüglich LME darüber berichtet.

Bei der Ermittlung von Ursachen für Risse in Stahlkonstruktionen in Europa musste jedoch festgestellt werden, dass eine optimale chemische Zusammensetzung der Stähle gemäß den japanischen Erfahrungen LME allein nicht verhindern kann, wenn andere LME begünstigende Faktoren einen ausreichend kritischen Zustand bewirken. Allgemein kann aber festgestellt werden, dass ein kleines Kohlenstoffäquivalent LME entgegen wirkt.



Handelskammer Luxemburg

2. Mechanische Eigenschaften der Stähle

Für die konstruktive und insbesondere feuerverzinkungsgerechte Gestaltung der Bauteile aus Stahl ist die Kenntnis der Eigenschaften der Stähle unerlässlich.

Die Streckgrenze R_e ist für die Bemessung der Bauteile bei quasi statischer Beanspruchung im Regelfall der maßgebende Festigkeitswert. Sie wird zusammen mit der Bruchspannung bzw. der Zugfestigkeit R_m , dem Elastizitätsmodul E , der Bruchdehnung A , der Gleichmaßdehnung A_g und der Brucheinschnürung Z in einem einachsigen Zugversuch bei Raumtemperatur und langsam ansteigender Belastung ermittelt.

Aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dieses Zugversuches ist zu erkennen, dass nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze und vor dem Eintreten des Trennbruchs größere Dehnungen auftreten. Damit wird im Bauteil der Trennbruch durch große Verformungen angekündigt. Diese Zähigkeit (Duktilität) hat entscheidenden Einfluss auf die Bewertung des Tragverhaltens, auf die Wahl des Berechnungsverfahrens und der -modelle sowie die Festlegung der Sicherheitsfaktoren im Stahlbau. Ausreichende Zähigkeit des Stahls ist auch Voraussetzung für die Machbarkeit der meisten Verarbeitungstechnologien. Um verformungsarme Sprödbrüche zu vermeiden, sind möglichst zähe Werkstoffe einzusetzen.

Das plastische Verformungsvermögen führt bei Zwängungsbeanspruchung auch zu einem Abbau der Zwängungskräfte und Eigenspannungen. So brauchen z. B. Eigenspannungen aus Schweiß- oder Walzprozessen, die oft so groß wie die Streckgrenze sein können, bei der Bemessung der Stahlbauteile nicht oder nur teilweise berücksichtigt zu werden.

Bauteile aus solch einem zähen Werkstoff können auch für eine „plastische Bemessung“

verwendet werden, d. h. eine Dehnung des Materials über die Elastizitätsgrenze hinaus wird zugelassen.

Die Verformbarkeit (Duktilität) kann aber bei den einzelnen Stahlsorten recht unterschiedlich ausfallen, wie in den Diagrammen im Bild 5 zu sehen ist.

Zum anderen ist zu beachten, dass das Verformungsvermögen der Stähle während des Feuerverzinkungsprozesses herabgesetzt wird (Bild 6).

Bei einer Erwärmung des Stahls kommt es zu einer Verringerung der Streckgrenze, der Bruchfestigkeit und des E-Moduls.

In den Spannungs – Temperatur – Diagrammen (Bild 7) wird schematisch die Verringerung der Streckgrenze für die drei häufigen Stähle S 235, HISTAR 355 (S 355) und einen HISTAR 460 (S 460) dargestellt.

Eine weitere Festigkeitseigenschaft dieser Kategorie ist die Härte. Der Härtewert dient z. B. zur Kontrolle der Gleichmäßigkeit der Festigkeitswerte eines Halbzeuges und kann annähernd zur zerstörungsfreien Bestimmung der Bruchfestigkeit verwendet werden.

Die Notwendigkeit ausreichender und der Vorteil hoher Zähigkeit des Stahls wurden bereits erwähnt.

Neben der Bruchdehnung A , der Gleichmaßdehnung A_g und der Brucheinschnürung Z ist die Kerbschlagarbeit A_v ein wichtiges Maß für die Beurteilung eines Stahls hinsichtlich seiner Zähigkeit.

Die Zähigkeitswerte können in einer Festigkeitsberechnung nicht wertmäßig verwendet werden; sie ermöglichen in erster Linie einen Vergleich von Stählen hinsichtlich ihrer Zähigkeit untereinander.

Bild 5 Spannungs-Dehnungs-Diagramme verschiedener Stähle

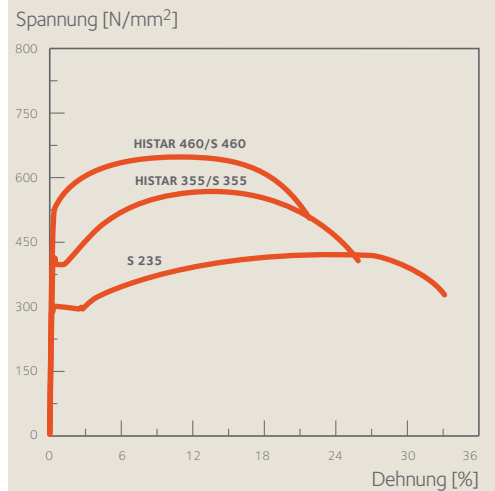


Bild 6 Schematisches Spannungs – Dehnungs – Diagramm für Baustahl S355 - Vergleich des Verhaltens bei Raumtemperatur (RT), bei 460°C in der Luft und in der Zinkschmelze

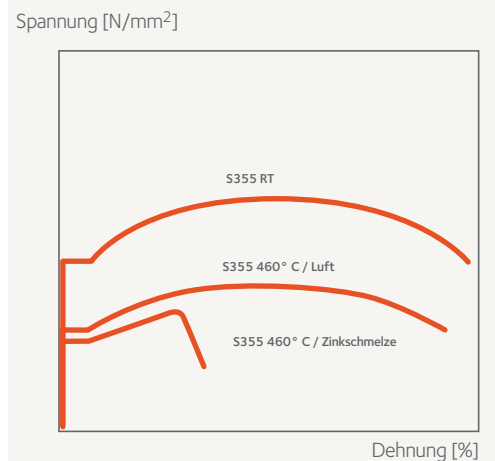
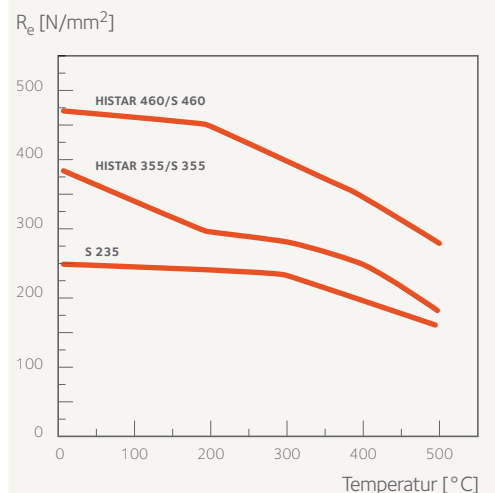


Bild 7 Spannungs-Temperatur-Diagramme



Sie ermöglichen zusammen mit der Erfahrung, die mit Stählen bekannten Tragverhaltens und bekannter Zähigkeit in Tragwerken gemacht wurden, eine Abschätzung, ob unter bestimmten Spannungsverhältnissen (eben oder räumlich, Last- und Eigenspannungen), Temperatur- und Belastungsverhältnissen (langsam oder plötzlich ansteigend) ein bestimmter Stahl verwendet werden kann, ohne dass ein verformungsarmer Spröbruch befürchtet werden muss.

Die Zähigkeit wird bei warmgewalztem Profilstahl in Walzrichtung gemessen. Quer zur Walzrichtung und rechtwinklig zur Erzeugnisoberfläche kann sie ohne besondere Maßnahmen geringer sein. Die Ursache hierfür sind nichtmetallische Einschlüsse, die beim Walzen parallel zur Oberfläche zu liegen kommen. Bei Beanspruchung rechtwinklig zur Oberfläche (vorwiegend bei geschweißten Konstruktionen) und zu geringer Zähigkeit kann es zum „Terrassenbruch“ kommen. Durch geeignete Beimengungen können diese Einschlüsse verringert bzw. verändert werden; die Stähle erhalten dann die s.g. „Z-Qualität“.

Die Ursache für die eingeschränkte Anwendbarkeit der genannten Zähigkeitswerte liegt in der unvollkommenen Erfassung der am Bauwerk tatsächlich vorhandenen Beanspruchungs- (ebener oder räumlicher Spannungszustand, Eigenspannungen) und Verformbarkeitsverhältnissen.

So sind es vor allem hohe Spannungen an den Enden natürlicher und herstellungsbedingter Risse und an den mehr oder weniger scharfen Kerben, herstellungsbedingte Eigenspannungen in Abhängigkeit der wirklichen Bauteilabmessungen, die Temperatur und die Belastungsgeschwindigkeit, die Einfluss auf das Spröbruchverhalten nehmen.

Um auch quantitativ die Neigung von Stählen zum spröden Bruchverhalten besser erfassen zu können, wird mit Hilfe von bruchmechanischen

Berechnungsverfahren und speziellen Versuchen an bauteilähnlichen Prüfkörpern, die den Spannungs- und Verformungszustand im Bauwerk besser erfassen, die „Bruchzähigkeit“ ermittelt. Dabei erhält man für bestimmte Beanspruchungsverhältnisse eine kritische Temperatur, bei der ein Riss nicht „langsam wächst“, sondern schlagartig zu einem Bruch des gesamten Prüfkörpers führt.

Bei der Herstellung der Stähle und Halbzeuge kann durch gezielte Verfahrensweisen (z. B. durch die Art der Beruhigung beim Vergießen) die Zähigkeit und auch die Terrassenbruchempfindlichkeit beeinflusst werden, zu erkennen in der Bezeichnung der Kerbschlagzähigkeit (für Baustähle JR, JO, J2, M, ML usw.).

Eine Verringerung der Spröbruchneigung und Verbesserung der Schweißneigung wird auch mit einem feinkörnigen Gefüge erreicht, z. B. bei höherfesten Feinkornbaustählen. Bei diesen Stählen wird durch die Feinkornbildung und nachträgliche Vergütung auch eine Anhebung

der Streckgrenze ohne Verringerung der Zähigkeit erreicht.

3. Schweißneigung

Von den Baustählen wird im Allgemeinen uneingeschränkte Schweißneigung verlangt und sie ist im Regelfall auch vorhanden. Das bedeutet, dass die Schweißtechnologie und die Zusatzwerkstoffe so ausgewählt werden, dass durch das Schweißen weder ein Festigkeits- noch ein Zähigkeitsabfall (Versprödung) in der Wärmeeinflusszone und in der Schweißnaht eintritt und auch die Rissneigung nicht größer als im Grundwerkstoff ist.

Bei der Herstellung der Stähle kann durch eine Erhöhung des Reinheitsgrades, durch bessere Steuerung der Legierungszusätze und durch bestimmte Verfahren, wie kontrolliertes, thermomechanisches Walzen und Abschrecken und Selbstanlassen die Schweißneigung verbessert werden.



Eisbahn Grenoble, Frankreich

4. Werkstofftechnische Hinweise für die konstruktive Gestaltung und Fertigung von Stahlkonstruktionen

Aus Bild 7 ist zu erkennen, dass die einzelnen Stahlgüten im Zugversuch ein sehr großes Dehnungsvermögen aufweisen. Im rechnerischen Grenzzustand der Beanspruchung wird dieses Dehnungsverhalten nur zu einem geringen Teil in Anspruch genommen. Durch Versprödung des Werkstoffes oder durch eine extreme, im Allgemeinen örtlich begrenzte Behinderung der Verformbarkeit mit der Entstehung eines ebenen, bei dicken Bauteilen vor allem räumlichen Spannungs-, vorwiegend Eigenspannungszustandes (z.B. auch im Grund einer Kerbe) oder durch Einlagern fremder Stoffe in das Gefüge kann es zu einer Verminderung des Dehnungsvermögens kommen. Wird dann die Dehngrenze überschritten, kommt es in einem Bauteil naturgemäß zum Trennbruch. Erfahrungsgemäß können sich mehrere dieser Einflüsse überlagern.

Es handelt sich hier um sehr komplexe Vorgänge mit phänomenologischem Charakter, Versuchsergebnisse zur Abschätzung der Zähigkeit bzw. Spröbruchneigung unterliegen im Allgemeinen sehr großen Streuungen. Es muss aber festgestellt werden, dass die Spröbruchempfindlichkeit erheblich durch die Fertigung (z. B. durch Gefügeänderungen im Schweißnahtbereich bei zu hoher Abkühlgeschwindigkeit), durch die konstruktive Gestaltung (z. B. durch Eigenspannungen) und durch die Nutzung (z. B. durch hohe Belastungsgeschwindigkeit) beeinflusst wird.

Es versteht sich von selbst, dass geschweißte Bauteile besonders betroffen sein können. Im Besonderen hat Wasserstoff in der Schweißnaht oder Wärmeeinflusszone in Verbindung mit Schrumpfeigenspannungen einen Einfluss auf die Heiß- und Kaltbrüchigkeit des Stahls. Neben Heißbrüchen während des Schweißens

müssen Kaltbrüche erwartet werden, wenn in der Schweißnaht oder Wärmeeinflusszone Wasserstoff aus dem Schweißvorgang vorhanden ist und Schrumpfeigenspannungen wirken. Der Wasserstoff bewirkt hier eine Verminderung des Formänderungsvermögens.

Das Beachten dieser Hinweise ist bei der Planung, der konstruktiven Gestaltung und der Fertigung von Stahlkonstruktionen, die feuerverzinkt werden sollen, von besonderer Bedeutung, da die beim Feuerverzinken zusätzlich einwirkenden Belastungen bei gleichzeitig während des Feuerverzinkungsprozesses verringerter Streckgrenze und vermindertem Formänderungsvermögens der Stähle zur Rissbildung durch LME oder auch Wasserstoffversprödung führen können.

Die Entstehung solcher verformungsarmen Trennungen beim Feuerverzinken ist bei allen Stählen möglich. Wesentlichen Einfluss auf die Bruchneigung haben, wie bereits erwähnt, Zugspannungen (meist Eigenspannungen), die im Bauteil durch die vorangegangenen Bearbeitungsprozesse entstanden sind.

5. Zur Entwicklung der Baustähle

Die Entwicklung der Baustähle ist gerichtet auf eine Erhöhung der Streckgrenze und Verbesserung der Schweißbarkeit mit einem Erhalt oder einer Verbesserung der Zähigkeit.

Erreicht wurden diese Verbesserungen durch eine Erhöhung des Reinheitsgrades des Stahls, durch die Verbesserung des Gefüges, z. B. homogenes Gefüge durch Feinkornbildung, durch die Ablösung des Blockguss- durch das Stranggussverfahren, durch kontrolliertes, thermomechanisches Walzen mit oder ohne Abschrecken und Selbstanlassen.





6. Anforderungen an das feuerverzinkungsgerechte Konstruieren

1. Allgemeines

Das feuerverzinkungsgerechte Konstruieren ist eine Untergruppe des korrosionsschutzgerechten Konstruierens und berücksichtigt zusätzlich spezifische Anforderungen an die Gestaltung von zu verzinkenden Konstruktionen, die sich aus dem Verfahren des Feuerverzinkens ergeben.

Feuerverzinken ist ein Schmelztauchverfahren. Alle verfahrenstechnischen Schritte – Oberflächenvorbehandlung (Entfetten, Beizen, Spülen, Fluxen) bis zum eigentlichen Verzinkungsprozess – finden in Werksanlagen (Wannen, Kessel) bestimmter Abmessungen in Lösungen bzw. in der Zinkschmelze ($440 \div 460^\circ\text{C}$) statt. Bei der Gestaltung sind alle sich daraus ergebenden Anforderungen zu beachten:

- Verfahrenstechnische Anforderungen
- Sicherheitsrelevante Anforderungen
- Anforderungen an die Werkstoffe, die Gestaltung und Fertigung von Bauteilen zur Vermeidung von Verzug und Rissen

Grundlegende Hinweise dazu werden in EN ISO 1461 bzw. EN ISO 14713 gegeben.

Die Form von Stahlbauten und deren korrosionsschutzgerechte Gestaltung haben außerdem entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit (Schutzdauer) und Instandhaltung (Zugänglichkeit, Erreichbarkeit) des Korrosionsschutzes.

Insofern gelten auch für zu verzinkende Konstruktionen die Grundregeln zur korrosionsschutzgerechten Gestaltung nach EN ISO 12944-3.

2. Verfahrenstechnische Anforderungen

2.1 Geometrie der Bauteile

Die Abmessungen von zu verzinkenden Bauteilen sollte so gewählt werden, dass sie in einem Arbeitsgang getaucht werden können.

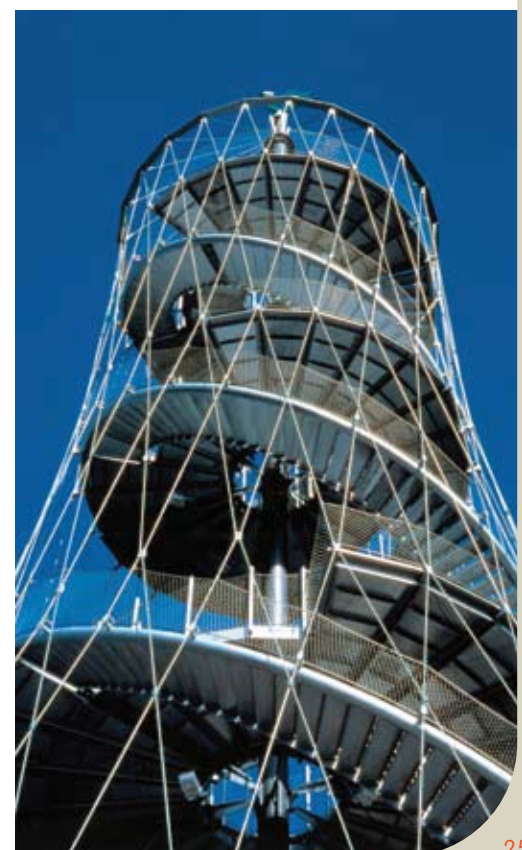
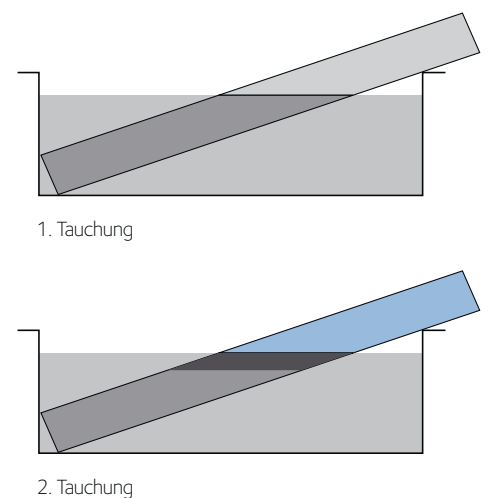
Deshalb sollte bereits dem Konstrukteur bekannt sein, welche nutzbaren maximalen Abmessungen Feuerverzinkungskessel besitzen.

Für Stahlkonstruktionen wirtschaftlich nutzbare Kessellaße sind:

- Länge ca. $7.00 \div 16.50$ m
- Breite ca. $1.30 \div 2.00$ m
- Tiefe ca. $2.20 \div 3.50$ m

Für Bauteile, die nicht in einem Arbeitsgang getaucht werden können (Bild 8 zeigt ein Beispiel für Doppeltauchung), sind besondere Maßnahmen zu treffen, da sich bedingt durch die ungleichmäßige Erwärmung des Bauteils die Gefahr des Verzuges und / oder der Rissbildung erhöht (s. a. 6.2.4). Eine vorherige Abstimmung mit dem Feuerverzinkungsunternehmen ist zweckmäßig.

Bild 8 Beispiel für Doppeltauchung



2.2 Freischnitte, Durchfluss- und Entlüftungsöffnungen

Für eine einwandfreie Oberflächen-
vorbehandlung und Verzinkung müssen
die Bauteile so gestaltet sein, dass die
Vorbehandlungslösungen und insbesondere
auch die Zinkschmelze alle Flächen
ungehindert erreichen und beim Ausziehen
auch ungehindert ablaufen können.

Lufttaschen und Lufteinschlüsse führen
zu unverzinkten Stellen und müssen
konstruktiv ausgeschlossen werden.

Das gilt nicht nur für Hohlprofilkonstruktionen
und Behälter, sondern auch für
Stahlkonstruktionen mit Aussteifungen,
Schottblechen, Lamellen o. ä., die beim
verfahrensbedingten Schrägeintauchen
und ohne entsprechende Freischnitte
Lufttaschen ausbilden können.

Die Größe der Durchflussöffnungen und
Freischnitte ist von der Zinkmenge, die die
Öffnungen passieren müssen, abhängig.
Die Höhe der Eintauchgeschwindigkeit ist ein
wichtiger Parameter für die Minderung des
Gefährdungspotenzials von Stahlkonstruktionen
im Hinblick auf LME. Im Abschnitt 8 wird
darauf noch gesondert eingegangen. Es
wurde experimentell ermittelt, dass mit
zunehmender Eintauchgeschwindigkeit
die Gefahr der LME abnimmt. Als optimale

Eintauchgeschwindigkeit wird ca. 5m/min
angesehen [11]. In Bild 9 werden Beispiele für
die Gestaltung von Freischnitten gegeben, Bild
10 zeigt Beispiele für Durchflussöffnungen.

Für Profilhöhen bis 300mm sollte $l_1 \geq 20\text{mm}$,
für Profilhöhen über 300mm $l_1 \geq 30\text{mm}$
betragen. Zum Erreichen der optimalen
Eintauchgeschwindigkeit sollte jedoch bei
LME-kritischen Stahlkonstruktionen die
Bemessung der Freischnitte unbedingt
in Abstimmung zwischen Stahlbauer
und Feuerverzinker erfolgen.

Durchflussöffnungen, z. B. bei
Trägeranschlüssen, Stützenfußbereichen,
Rahmenecken o. ä., sind mit einem Durchmesser
> 10mm bis ca. 35 mm auszuführen.
Beispiele hierfür sind in Bild 10 dargestellt.

Bild 9 Beispiele für Freischnitte

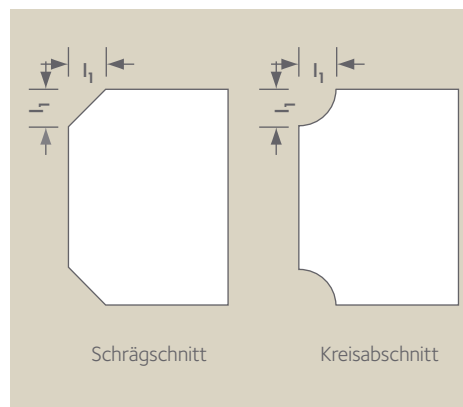
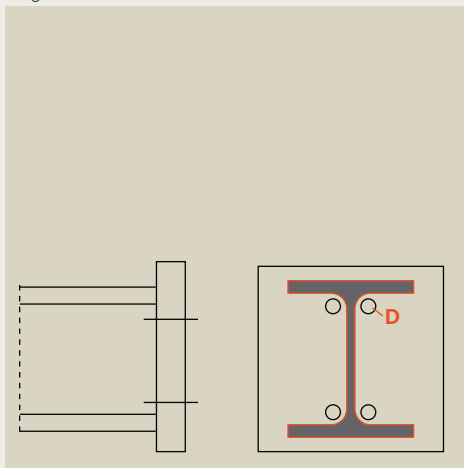
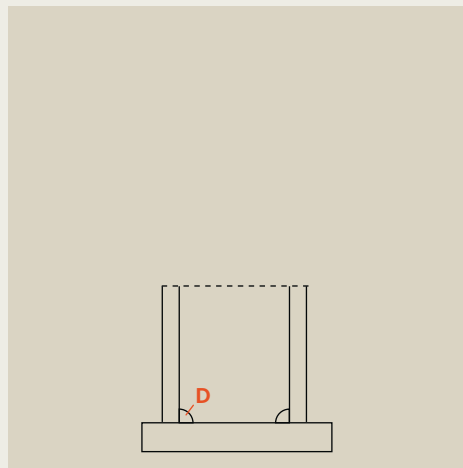


Bild 10 Beispiele für Durchflussöffnungen

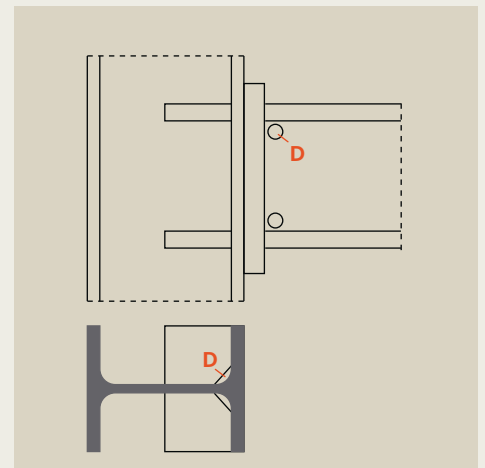
Trägeranschluss



Stützenfuß



Rahmenecke



2.3 Sicherheitsrelevante Anforderungen aus dem Verfahren

Bei Hohlkörpern oder auch indirekten Hohlkörpern, wie z. B. dicht geschweißte Überlappungsflächen, dehnt sich eingeschlossene Luft bei der für die Zinkschmelze typischen Temperatur von $440 \div 460^\circ\text{C}$ so stark aus, dass Explosionsgefahr besteht. Aber auch in Spalten mit nicht dicht geschweißten Überlappungen kann Flüssigkeit aus den Vorbehandlungsbädern eindringen, die beim Eintauchen in die Zinkschmelze explosionsartig verdampfen kann.

Überlappungsflächen sind aus sicherheitstechnischen Gründen, aber auch aus Gründen des Korrosionsschutzes nach Möglichkeit zu vermeiden.

Für nicht vermeidbare Überlappungsflächen gibt Tabelle 4 einige Hinweise.

Das Ausführen von Entlastungsbohrungen bei größeren Überlappungsflächen beseitigt zwar die Explosionsgefahr beim Verzinken, führt aber bei der Nutzung solcher Konstruktion zu korrosionsschutztechnischen Problemen.

Eingedrungene Vorbehandlungslösungen verdampfen meist nicht zu 100 %, zumindest verbleiben Salze in diesen Spalten.

Ein „Verlöten“ der Spalte durch Zink erfolgt durch das Verdampfen dieser Flüssigkeiten während des Verzinkens meist nicht. Insofern kann es in diesem Bereich der Konstruktionen zu Korrosion kommen.

Tabelle 4 Empfehlungen zur maximalen Größe von Überlappungsflächen

Überlappungsflächen	Maßnahmen
bis 100 cm^2 (Blechdicke $< 12\text{ mm}$)	umlaufend dicht schweißen
bis 400 cm^2 (Blechdicke $\geq 12\text{ mm}$)	umlaufend dicht schweißen



2.4 Hinweise zur feuerverzinkungsgerechten konstruktiven Gestaltung

Bei der Planung und Konstruktion von Stahlbauteilen sind wesentliche Grundsätze des korrosionsschutzgerechten und insbesondere des feuerverzinkungsgerechten Konstruierens zu beachten. Nur dann können ausreichender Korrosionsschutz und befriedigende Zinküberzüge erreicht und ein Verzug der Konstruktion, Risse oder andere Beschädigungen der Bauteile weitestgehend vermieden werden. Bei der Planung von Stahlbauteilen, die feuerverzinkt werden sollen, sollte möglichst frühzeitig eine Abstimmung mit dem Feuerverzinkungsunternehmen erfolgen.

Der Gefahr des Entstehens von Rissen und eines Verziehens der Stahlkonstruktionen beim Feuerverzinken kann durch nachfolgende konstruktive und technologische Maßnahmen begegnet werden.

- Bereits bei der Planung sollte der Stahlbauer bemüht sein, fertigungsbedingte

Eigenspannungen, vor allem Schweißeigen-
spannungen, möglichst niedrig zu halten. Hierbei kann das Aufstellen eines Schweißfolgeplans und seine Einhaltung bei der Fertigung behilflich sein. Mit Zunahme der Dicke der Bauteile wächst die Gefahr eines räumlichen Spannungszustandes und höherer Abkühlgeschwindigkeiten und damit die Gefahr von Rissen.

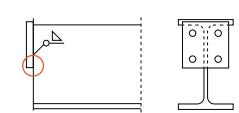
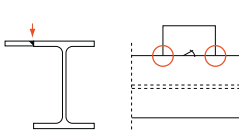
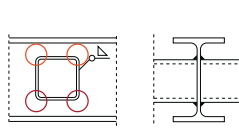
- Dickenunterschiede von unmittelbar verschweißten Bauteilen sollten nicht mehr als das 2,5 fache betragen. Mit zunehmender Blechdicke und bei schweißintensiven Konstruktionen sollte das Verhältnis der Blechdicken noch kleiner gewählt werden.
- Konsequente Einhaltung der Forderungen des feuerverzinkungsgerechten Konstruierens, besonders bei Verwendung höherfester Baustähle mit niedriger Kerbschlagfestigkeit. Freischnitte und Ablaufbohrungen sind auf ein Mindestmaß zu reduzieren, bei unsachgemäßer Ausführung erhöht sich

die Gefahr von Rissen, insbesondere im Schweißnahteinflussbereich. Abstimmungen mit dem Feuerverzinker sind zu empfehlen.

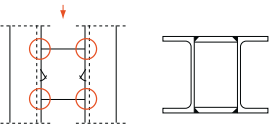
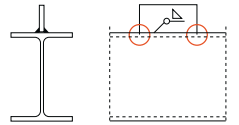
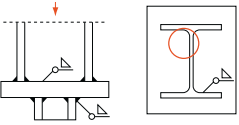
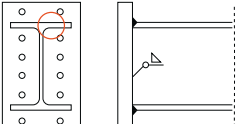
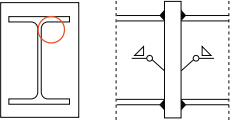
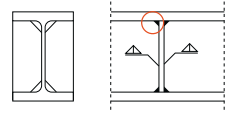
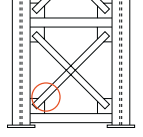
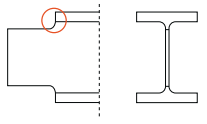
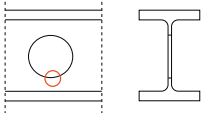
- Bauteile, bei denen eine innere statische Unbestimmtheit Zwängungsspannungen im Zinkbad entstehen lässt, sollten vermieden werden.
- Die tatsächlichen Werkstoffkennwerte und die chemische Zusammensetzung der zu verzinkenden Bauteile sind vor dem Verzinken bekannt zu geben. Der Verzinker sollte informiert werden, aus welchen Stählen die zu verzinkenden Bauteile sind.
- Mehrfachtauchungen sind zu vermeiden.

Nachfolgende Tabelle zeigt einige Konstruktionsdetails, die hinsichtlich der Ausführung in Verbindung mit dem Feuerverzinken als LME-kritisch eingeschätzt werden müssen.

Tabelle 5 Konstruktionsdetails und Fertigungshinweise

Nr	Konstruktionsdetail	Beschreibung
1		Im gekennzeichneten Bereich entstehen durch das Anschweißen der „halben Stirnplatte“ größere Eigenspannungen Empfehlung: Stirnplatte über die gesamte Profilhöhe führen oder geschraubter Anschluss
2		Im gekennzeichneten Bereich entstehen durch das Anschweißen des Knotenbleches größere Eigenspannungen Empfehlung: Anschlussbereich mit Wärme behandeln und/oder ausrunden
3		In den vier Ecken des durchgesteckten Kastenprofils entstehen durch die Schweißnähte größere Eigenspannungen Empfehlung: Anschlussbereich mit Wärme behandeln

6. Anforderungen an das feuerverzinkungsgerechte Konstruieren

Nr	Konstruktionsdetail	Beschreibung
4		<p>In den vier Ecken des eingeschweißten Knotenbleches entstehen durch die Schweißnähte größere Eigenspannungen</p> <p>Empfehlung: Anschlussbereich mit Wärme behandeln</p>
5		<p>An den Enden des angeschweißten Knotenbleches entstehen durch die Schweißnähte größere Eigenspannungen</p> <p>Empfehlung: Anschlussbereich mit Wärme behandeln</p>
6		<p>Durch die Steifigkeitsunterschiede zwischen I-Profil und „dicker Fußplatte“ und durch die Schweißnähte entstehen größere Eigenspannungen</p> <p>Empfehlung: Anschlussbereich mit Wärme behandeln</p>
7		<p>Durch die Steifigkeitsunterschiede zwischen I-Profil und „dicker Stirnplatte“ und durch die Schweißnähte entstehen größere Eigenspannungen. Das Herstellen der Schraubenlöcher bedingt Aufhärtungen an den Rändern</p> <p>Empfehlung: Anschlussbereich mit Wärme behandeln, Schraubenlöcher sorgfältig bohren</p>
8		<p>Durch die Steifigkeitsunterschiede zwischen I-Profil und „dicker Stirnplatte“ und durch die Schweißnähte entstehen größere Eigenspannungen</p> <p>Empfehlung: Anschlussbereich mit Wärme behandeln</p>
9		<p>Das Einschweißen der Steife zwischen die I-Profilgurte führt zu größeren Eigenspannungen</p> <p>Empfehlung: Anschlussbereich mit Wärme behandeln</p>
10		<p>Die Konstruktion ist innerlich statisch unbestimmt. Bei der unvermeidbaren unterschiedlichen Erwärmung der Bauteile entstehen Eigenspannungen.</p> <p>Empfehlung: Diagonalen mit den Gurten durch Schrauben miteinander nach dem Verzinken verbinden</p>
11		<p>An den Ausrundungen kann es durch unsachgemäße Bearbeitung zu Aufhärtungen und starken Kerben kommen</p> <p>Empfehlung: Ausrundungen sorgfältig herstellen und mit Wärme behandeln</p>
12		<p>An den Lochrändern kann es durch unsachgemäße Bearbeitung zu Aufhärtungen und starken Kerben kommen</p> <p>Empfehlung: Ausrundungen sorgfältig herstellen und mit Wärme behandeln</p>



Einkaufszentrum "Les 4 Temps", Paris, Frankreich



7. Anforderungen an die Fertigung von Stahlkonstruktionen

1. Zu den Eigenspannungen im Bauteil

Risse beim Feuerverzinken von Stahlkonstruktionen entstehen meist an den Stellen, die durch Fertigungsprozesse wie

- Schweißen,
- Brennschneiden,
- Schleifen,
- Bohren,
- Stanzen,
- Kaltumformung (Alterung),
- Richten

hohe Eigenspannungen (Zugspannungen), Kerben und/oder Aufhärtungen aufweisen.

Eigenspannungen entstehen aber auch bei einer Dehnungsbehinderung im Zinkbad. Mit dem Einwirken der Verzinkungswärme (ca. 450 °C) verändern sich während des Verzinkungsprozesses sowohl dieser Spannungszustand als auch die mechanischen Eigenschaften des Stahls (Streckgrenze und E-Modul werden kleiner) und damit die Steifigkeit der Bauteile. Spannungen, meist örtlich begrenzt, können ab- aber auch aufgebaut werden und Verformungen (Verzug) können entstehen.

Die Schwierigkeit liegt aber in der Bestimmung der Eigenspannungen, sie können praktisch nur grob geschätzt werden. Die vielen Einflussfaktoren aus der Fertigung und der konstruktiven Gestaltung können kaum ausreichend genau qualitativ, erst recht kaum quantitativ erfasst werden. Dem Stahlbaukonstrukteur ist im Regelfall der Eigenspannungszustand weitestgehend unbekannt.

Das plastische Arbeitsvermögen der Baustähle erlaubt es, in den meisten Fällen auf eine genaue Erfassung der Eigenspannungen verzichten zu können, sie sind im Allgemeinen örtlich begrenzt und werden nach der Überlagerung

mit Lastspannungen und Überschreiten der Elastizitätsgrenze abgebaut. Voraussetzung ist, dass der Werkstoff hinsichtlich seiner Zähigkeit unter Berücksichtigung der Bauteilabmessungen und der Einsatztemperatur, siehe DAST-Richtlinie 009 und EN 1993-1-10, richtig ausgewählt wurde. Bei zu verzinkenden Bauteilen muss besonders darauf geachtet werden, dass die Eigenspannungen gering bleiben. Dies muss in der Regel durch konstruktive Maßnahmen erreicht werden, um eine nachträgliche Wärmebehandlung (Spannungsarmglühen) zu vermeiden.

Aber auch bei der Fertigung der Konstruktionen können hohe Eigenspannungen und Aufhärtungen vermieden werden, z. B. durch

- mehrlagig geschweißte Kehlnähte, die beim heutigen Stand der Schweißtechnik einlagig geschweißt werden könnten,
- Aufstellen von Schweißfolgeplänen,
- Vermeiden langer und dicker Schweißnähte,

- Vermeiden von Kaltverformungen oder Beseitigung der entstandenen Eigenspannungen durch Wärmebehandlung (wobei zu beachten ist, dass hierdurch die Auswirkungen des Kaltumformens nicht vollständig aufgehoben werden),
- Begrenzen von Kerben insbesondere im dünneren Bauteil von Schweißkonstruktionen und Bereichen mit fertigungsbedingten Gefügeveränderungen (Kaltverformung, Schweißen, Brennschneiden, Bohren, Stanzen u.a.) oder Entfernung durch fachgerechte Nachbearbeitung.

2. Oberflächenbeschaffenheit warmgewalzter Langprodukte

Im Normalfall ist die Oberfläche der zum Feuerverzinken vorgesehenen Walzprodukte fettfrei und entspricht hinsichtlich der Beschaffenheit, falls nicht anders vereinbart, der Grundanforderung gemäß EN 10163-3: 1991, Klasse C, Untergruppe 1.

Ungänzen, welche das Korrosionsverhalten des Zinküberzugs beeinträchtigen könnten, müssen vor dem Feuerverzinken entfernt werden.





Parkhaus Rheda Wiederbrück, Deutschland

8. Anforderungen an das Feuerverzinkungsverfahren

Wie im Abschnitt 4.3 ausgeführt, ist für die Rissauslösung bei Stählen durch LME das Vorhandensein eines korrosiv wirkenden Flüssigmetalls, das mit einem LME-anfälligen Festmetall in Kontakt kommt, eine Grundvoraussetzung. Diese Voraussetzung ist beim Feuerverzinken zwangsläufig gegeben (Flüssigmetall = Zinkschmelze, Festmetall = Stahl), da nur auf diese Weise der Zinküberzug hergestellt werden kann.

So wie in den vorhergehenden Abschnitten Anforderungen an die Stahlherstellung und Planung und Konstruktion sowie Fertigung von Stahlkonstruktionen gestellt wurden (insbesondere durch geeignete Maßnahmen, Eigenspannungen so niedrig wie möglich zu halten), müssen auch beim Feuerverzinkungsprozess Maßnahmen ergriffen werden, um das Risiko hinsichtlich Wasserstoffversprödung und Rissauslösung durch LME so weit wie möglich zu reduzieren.

Aus umfangreichen Untersuchungen [9, 12, 13] kann abgeleitet werden, dass von den Verfahrensparametern des Feuerverzinkens der sich beim Eintauchen der Konstruktionen in die Zinkschmelze ergebende Temperaturgradient und seine Änderung während der Zeit bis zum vollständigen Eintauchen der Konstruktion von wesentlicher Bedeutung für LME ist. Hierbei ist das Gefährdungspotenzial gegenüber LME umso geringer, je kleiner der Temperaturgradient ist [14].

Der Wärmeübergangskoeffizient und die Benetzungsfähigkeit von Zinkschmelzen wird mit zunehmendem Gehalt an Legierungselementen, insbesondere Zinn (Sn), Blei (Pb) und Wismut (Bi), größer, wodurch die Durchwärmzeit reduziert und damit das LME-Risiko erhöht wird. Auf der Grundlage o.g. Erkenntnisse wurden Untersuchungen durchgeführt, mit der

Zielstellung, den Temperaturgradienten durch Veränderungen von Verfahrensparametern beim Feuerverzinken zu verringern [11].

Der Temperaturgradient kann reduziert werden durch

- Veränderung der Zinkschmelzesammensetzung hinsichtlich optimaler Gehalte an Legierungsbestandteilen, insbesondere Sn, Pb und Bi,
- Erhöhung der Eintauchgeschwindigkeit (ca. 5m/Min),
- Steiler Eintauchwinkel,
- Erhöhung des Salzgehaltes im Flux (ca. 500g/l),
- Trockentemperatur nach dem Fluxen möglichst um 100°C, damit eine hohe

Vorwärmtemperatur der Bauteile vor dem Eintauchen in die Zinkschmelze erreicht wird,

- Zinkschmelzetemperatur so niedrig wie möglich, um die Temperaturdifferenz zwischen Bauteil und Zinkschmelze so gering wie möglich zu halten.

Augrund von aktuellen Versuchsergebnissen wird heute davon ausgegangen, dass Zinn bis zu 0,1% und/oder Wismut bis zu 0,1% einen vernachlässigbaren Einfluss auf LME haben. Dabei sollte der Gehalt an Blei auf 0,8% begrenzt werden.

Es muss aber hier darauf hingewiesen werden, dass auch eine klassische oder eine wie oben beschriebene Zinkschmelze LME-kritisch sein kann, insbesondere wenn bei LME-kritischen Konstruktionen die Anforderungen an die Werkstoff- und Bearbeitungsqualität (siehe Kapitel 5 bis 7) nicht eingehalten werden.





9. Duplex-Systeme

Feuerverzinkte Stahlkonstruktionen werden von vielen Architekten bewusst als gestalterisches Element angewendet.

Dennoch gewinnt die zusätzliche Beschichtung des Zinküberzuges mit Flüssig- oder Pulverbeschichtungen – das sogenannte Duplex-System – in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung.

Duplex-Systeme werden vorteilhaft angewendet, wenn nachfolgende Gesichtspunkte von Bedeutung sind:

- Lange Schutzdauer
Die Schutzdauer des Duplex-Systems ist um den Faktor 1,2 bis 1,5 höher als die Summe der Schutzdauer der Feuerverzinkung + Beschichtung (Synergieeffekt).
- Farbtonvielfalt
- Signalgebung / Kennzeichnung / Tarnung
- Die Beschichtung von feuerverzinkten Konstruktionen ist auch dann zweckmäßig, wenn in bestimmten Fällen der Eintrag von Zink in die Umgebung vermieden oder gemindert werden soll.

Es ist vorteilhaft, zumindest die erste Schicht des Beschichtungssystems in der Werkstatt, wenn möglich gleich im Nachgang zur Feuerverzinkung, ausführen zu lassen.

Dadurch werden aufwändige Oberflächenvorbereitungsmaßnahmen auf der Baustelle vermieden.

Qualitativ hochwertige Duplex-Systeme setzen voraus, dass die Feuerverzinkung und die Beschichtung optimal aufeinander abgestimmt sind.

Der Auswahl geeigneter Beschichtungsstoffe kommt besondere Bedeutung zu. Es sollten nur solche Beschichtungssysteme verwendet werden, die sich auf einer Stückverzinkung nach EN ISO 1461 in Eignungsprüfungen nachweislich bewährt haben.

Die Anforderungen an die Oberflächen-vorbereitung/-vorbehandlung sind abhängig von der Art des Beschichtungsstoffes.

Zinkoberflächen zum Pulverbeschichten müssen unmittelbar vor dem Beschichten gesweept, phosphatiert oder chromatiert werden.

Für Flüssigbeschichtungsstoffe ist eine Oberflächenvorbereitung des Zinküberzuges durch Sweepen beim heutigen Stand der Technik nur dann erforderlich, wenn die Zinkoberfläche überwiegend mit die Haftung störenden festhaftenden Korrosionsprodukten des Zinks (Weißrost) versehen ist oder die Art des vorgesehenen Beschichtungsstoffes in Verbindung mit den Korrosionsbelastungen Sweepen im Technischen Merkblatt des Beschichtungsstoffherstellers zwingend fordert.

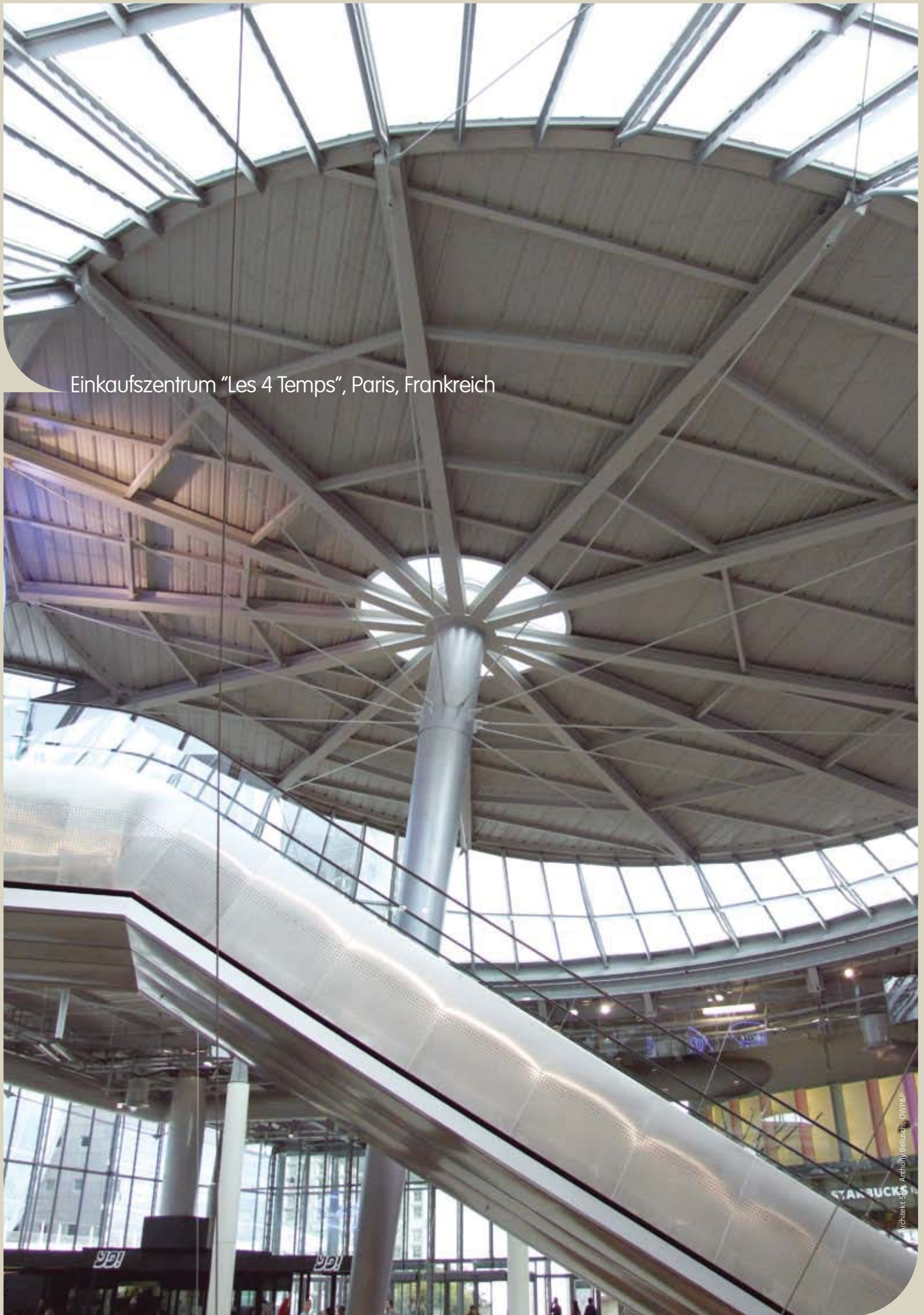
Das Ziel des Sweep-Strahlens ist es, Beschichtungen oder Überzüge nur an ihrer Oberfläche zu reinigen oder aufzurauen. Sweepen ist für Zinküberzüge eine starke mechanische Beanspruchung und kann bei unsachgemäßer Ausführung im Überzug zu Schäden führen (Risse, Abplatzungen).

Optimale Parameter für das Sweepen sind [15]:

- Strahlmittel nichtmetallische Schlacken, Korund, Glasperlen
- Teilchengröße Strahlmittel: 0.25 ÷ 0.50 mm
- Strahlendruck an der Düse: 2.5 ÷ 3.0 bar
- Strahlwinkel: <30° (Bauteilgeometrie beachten)

Detaillierte Angaben zu Duplex-Systemen mit Flüssig- und Pulverbeschichtungen werden in [16] gegeben.

Einkaufszentrum "Les 4 Temps", Paris, Frankreich



10. Wirtschaftlichkeit

Das Feuerverzinken ist für atmosphärisch beanspruchte Stahlbauteile hochwirksamer Korrosionsschutz mit langer Schutzdauer. In vielen Anwendungsfällen stimmen Schutzdauer und Nutzungsdauer überein. Zinküberzüge sind wartungsarmer bzw. wartungsfreier Korrosionsschutz. Bei Betrachtung der Kosten, die für Korrosionsschutzmaßnahmen einschließlich Wartungs- und Instandsetzungskosten während der Nutzungsdauer von Stahlbauten aufzubringen sind, ist Feuerverzinken mit großem Abstand die wirtschaftlichste Korrosionsschutzmaßnahme für Stahlbauten.

Entgegen der landläufigen Auffassung, nach der die Feuerverzinkung erst unter Berücksichtigung des Faktors Zeit das wirtschaftlichere Korrosionsschutzsystem ist, bringt die Feuerverzinkung heute bereits bei den Erstschutzkosten bei vielen Konstruktionsarten deutliche Kostenvorteile gegenüber alternativen Beschichtungssystemen. Nach Ermittlungen ist ein dreischichtiges Beschichtungssystem ab einer spezifischen Oberfläche von 15 bis 20 m²/t bereits in den Erstschutzkosten höher als der Korrosionsschutz durch Feuerverzinken [17].

Bei der Entscheidung über das geeignete Korrosionsschutzsystem sollten Architekten und Planer diesem Aspekt größere Bedeutung beimessen als bisher.

Sollen höhere ästhetische Anforderungen erfüllt werden als das mit Zinküberzügen möglich ist, ist selbst ein einfaches Duplex-System, z. B. Beschichtung des Zinküberzugs mit einer Schicht mit Beschichtungsstoffen, die Sweepen nicht erforderlich machen, in die Betrachtungen einzubeziehen.

In jedem Fall ist ein Kostenvergleich bei der Auswahl des Korrosionsschutzsystems vorteilhaft.



Parkhaus Bouillon, Luxemburg

Referenzen

1. Literatur

- [1] Dr.-Ing. D. Knotkova
Aktuelle Erkenntnisse zum
Korrosionsverhalten von Zink und
Zinküberzügen
Vortrag 4. Deutscher Verzinkertag
1995 Köln
- [2] Dr.-Ing. Knotkova und F. Porter
Longer life of galvanized steel in the
atmosphere due to reduced SO₂-pollution
in Europe
Proc. of Intergalva 1994, Paris
- [3] F. von Assche
Atmospheric conditions and hot dip
galvanizing performance
Proc. Intergalva 1997, Birmingham,
EGGA UK
- [4] Katzung, W. und Mitarb.
Zum Einfluss von Si und P auf das
Verzinkungsverhalten von Baustählen
Mat.-wiss. u. Werkstofftech.
28, 575 – 587 (1997)
- [5] Katzung, W. und Mitarbeiter; FuE-Bericht
Institut für Stahlbau Leipzig GmbH,
Arno-Nitzsche-Str. 45, D-04277 Leipzig
(unveröffentlicht)
- [6] Katzung, W.; Rittig, R.; Schubert, P. und
Schulz, W. D.
Zum Einfluss von Abkühlverlauf und
Tauchdauer auf die Haftfestigkeit und das
Bruchverhalten von Zinküberzügen nach
DIN EN ISO 1461
Mat.-wiss. und Werkstofftechnik 32,
483-492 (2001)
- [7] Katzung, W. und Schulz, W. D.
Zum Feuerverzinken von
Stahlkonstruktionen – Ursachen und
Lösungsvorschläge zum Problem der
Rissbildung
Stahlbau, 74. Jahrgang (2005), Heft 4
- [8] Pargeter, R.
Liquid metal penetration during hot dip
galvanizing
Veröffentlicht: TWI Website
- [9] Kinstler, Thomas J.
Current Knowledge of the Cracking of
Steels During Galvanizing
GalvaScience LLC, PO Box 501, Springville,
AL 35146
- [10] Kikuchi, M.
Liquid Metal Embrittlement of Steels
during Hot Dip Galvanizing
Tetsu to Hagane, Iron and Steel, Volume
68, Number 14, 1982,
Pages 1870-1879
- [11] Pankert, R., Dhaussey, D., Beguin, P., Gilles, M.
Three Years Experience with the Galveco
Alloy Proceedings Twentieth International
Galvanizing Conference
Amsterdam, 2003, European General
Galvanizers Association
- [12] Interpretation zinc assisted cracking on big
scale steel structures and preventive
methods. 2001, referiert in ILZRO Project
ZC – 21 – 2.
- [13] Poag, G., Zervoudis, J.
Influence of various parameters on steel
cracking.
AGA Tech Forum, Oct. 8. 2003. Kansas City,
Missouri.
- [14] Pinger, T.
Vermeidung von Flüssigmetall induzierter
Spannungsrissskorrosion an feuerver-
zinkten Stahlkonstruktionen
RWTH Aachen, Dissertation in
Vorbereitung
- [15] Schulz, W. D.; Schubert, P.; Katzung, W.;
Rittig, R.
Richtiges Sweepen von
Feuerzinküberzügen nach DIN EN ISO
1461
Der Maler- und Lackierermeister 7/99
- [16] Verbände-Richtlinie Korrosionsschutz von
Stahlbauten – Duplex-Systeme
Herausgegeben von Bundesverband
Korrosionsschutz e.V., Köln
Deutscher Stahlbauverband e. V.,
Düsseldorf
Industrieverband Feuerverzinken e. V.,
Düsseldorf
Verband der Lackindustrie e. V., Frankfurt
- [17] Dipl.-Ing. P. Kleingarn
Wirtschaftlicher und zuverlässiger
Korrosionsschutz durch Feuerverzinken
Feuerverzinken (28. Jahrgang) Nr. 3, Sept.
1999

2. Normen und weiterführende Literatur

- EN ISO 1461
Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrauchte Zinküberzüge (Stückverzinken)
- Katzung, W. und Marberg, D.
Beuth-Kommentare
Korrosionsschutz durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrauchte Zinküberzüge (Stückverzinken), Kommentar zu DIN EN ISO 1461 (2002)
- EN ISO 14713
Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion – Zink- und Aluminiumüberzüge – Leitfäden
- EN ISO 12944-1-8
Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme
- DIN 267 Teil 10
Mechanische Verbindungselemente – Technische Lieferbedingungen – Feuerverzinkte Teile
- EN 10025 : 2004
Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen
- EN 1993-1-10
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Stahlgütewahl
- DASt Richtlinie 009
Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten
- Korrosionsschutz durch Feuerverzinken (Stückverzinken)
Institut Feuerverzinken GmbH,
Sohnstraße 70, D-40237 Düsseldorf
- Maaß, P. und Peißker, P.
Handbuch Feuerverzinken
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig, Stuttgart 1993
- Arbeitsblätter Feuerverzinken
Institut Feuerverzinken GmbH,
Sohnstraße 70, D-40237 Düsseldorf

Notizen

A series of horizontal dotted lines for writing notes.

Technische Beratung & Anarbeitung der Träger

Technische Beratung

Um die Verwendung unserer Produkte und Lösungen in Ihren Projekten zu optimieren und sämtliche Fragen rund um den Einsatz von Profil- und Stabstahl zu beantworten, stellen wir Ihnen eine kostenlose technische Beratung zur Verfügung. Diese reicht vom Tragwerksentwurf und der Vordimensionierung über Oberflächen- und Brandschutz, Metallurgie bis hin zu Konstruktionsdetails und zur Schweißtechnik.

Unsere Spezialisten stehen Ihnen jederzeit zur Verfügung, um Sie bei Ihren Aktivitäten weltweit zu unterstützen.

Zur Erleichterung der Planung Ihrer Projekte bieten wir außerdem umfangreiche Software und technische Dokumentationen an, die Sie auf folgender Website aufrufen oder herunterladen können.

sections.arcelormittal.com

Anarbeitung der Träger

Wir halten verschiedene technische Einrichtungen für die Anarbeitung vor, um das Angebot zu optimieren.

Unsere Möglichkeiten zur Anarbeitung umfassen folgende Prozesse:

- Bohren
- Brennschneiden
- Zuschneiden auf T-Querschnitt
- Ausklinken
- Überhöhen
- Biegen
- Richten
- Kaltsägen auf exakte Längen
- Aufschweißen von Kopfbolzendübeln
- Strahlen
- Oberflächenbehandlung

Building & Construction Support

ArcelorMittal verfügt über ein professionelles Team, das sich quer über alle Stahlprodukte von ArcelorMittal ganz dem Baubereich widmet

Die Erzeugnisse sowie die Anwendungsmöglichkeiten in der Baubranche: Tragwerke, Fassaden, Dächer, etc. finden Sie auf der Website

www.constructalia.com

Ihre Partner

DEUTSCHLAND

ArcelorMittal
Commercial Sections
Subbelrather Straße 13
D-50672 Köln
Tel.: +49 221 572 90
Fax.: +49 221 572 92 65
sections.deutschland@arcelormittal.com

ArcelorMittal
Commercial Sections
Augustenstraße 14
D-70178 Stuttgart
Tel.: +49 711 667 40
Fax.: +49 711 667 42 40
sections.deutschland@arcelormittal.com

sections.arcelormittal.com

Bauen mit Stahl
Sohnstraße 65
D-40237 Düsseldorf
Tel.: +49 211 670 78 28
Fax.: +49 211 670 78 29
www.bauen-mit-stahl.de

ÖSTERREICH

ArcelorMittal
Commercial Sections
Vogelweiderstraße 66
A-5020 Salzburg
Tel.: +43 662 886 74 4
Fax.: +43 662 886 74 41 0
sections.austria@arcelormittal.com

SCHWEIZ

ArcelorMittal
Commercial Sections
Innere Margarethenstrasse 7
CH-4051 Basel
Tel.: +41 612 277 77 7
Fax.: +41 612 277 76 6
sections.switzerland@arcelormittal.com

sections.arcelormittal.com

SZS
Stahlbau Zentrum Schweiz
Seefeldstrasse 25
CH-8034 Zürich
Tel.: +41 442 618 98 0
Fax.: +41 442 620 96 2
www.szs.ch

ArcelorMittal
Commercial Sections

66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette
LUXEMBOURG
Tel.: + 352 5313 3010
Fax: + 352 5313 2799

sections.arcelormittal.com



Mix

Produktgruppe aus vorbildlich bewirtschafteten
Wäldern und anderen kontrollierten Herkünften
www.fsc.org Zert.-Nr. EUR-COC-051203
© 1996 Forest Stewardship Council