



Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen – Gestern | Heute | Morgen

GAV-Forschungskolloquium 2023 - 16./17. Oktober 2023
Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Korrosion



maler.org

	ca. 3,5% des BIP
Land	Korrosionskosten [Mrd. € / Jahr]
Deutschland	80
Schweiz	10,5
EU (vor Osterweiterung)	290
USA	290
EU + USA	580

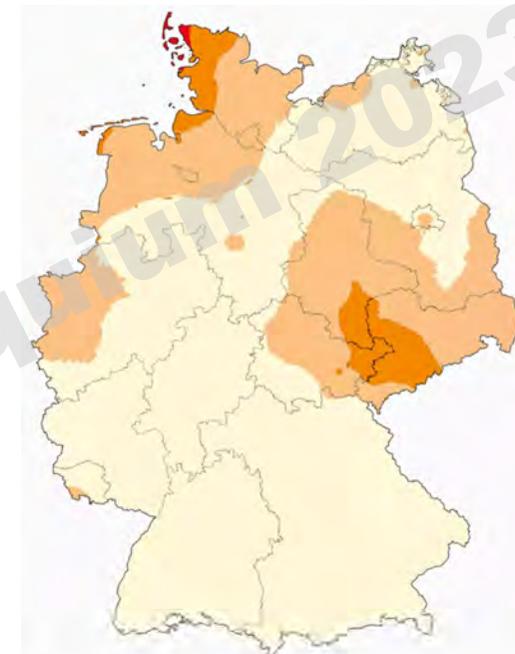
Branche / Objekte	Korrosionsbedingte Instandhaltungskosten [% des Neuwerts]
Motorfahrzeuge	14
Stahlhochbau	5
Chemische Anlagen	4,5
Straßenbrücken (Schweiz)	5,7
Durchschnitt Industrieproduktion	6

Bindschedler - Volkswirtschaftliche Bedeutung der Korrosion (2006)

Feuerverzinken

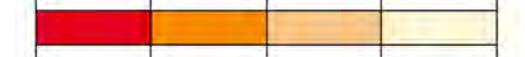


brista.de



Korrosionsrate in $\mu\text{m}/\text{Jahr}$

2,5 1,7 1,3 0,8 0,5



34 50 65 106 170

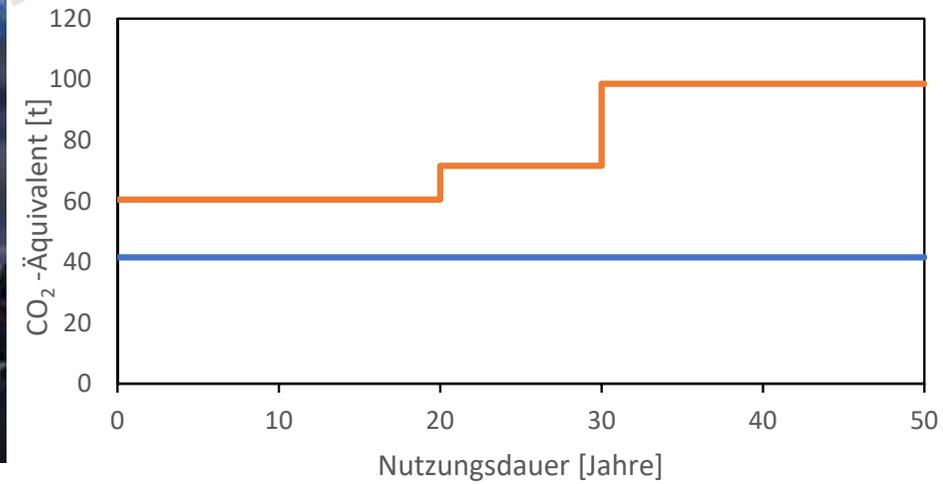
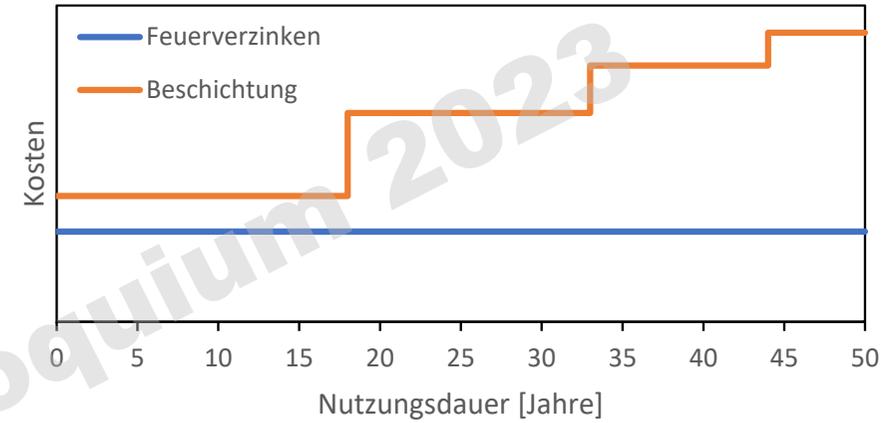
Schutzdauer Zinküberzug 85 μm in Jahren

feuerverzinken.com

Feuerverzinken



brista.de



TU Berlin – Ökobilanzieller Vergleich von Korrosionsschutzsystemen für Stahlbauten

Feuerverzinken im Bauwesen

Ende 19 Jhdt.

- Wellbleche (Nissenhütten etc.)

Anfang 20. Jhdt.

- Lichtmasten
- Hochspannungsmasten
- Bauteile für Gebäude
- etc.



feuerverzinken.com

Mitte 20. Jhdt.

- techn.- wiss. Durchleuchtung der Prozessschritte
- kleine Konstruktionen

1967: Erste Richtlinien für Zinküberzüge durch Feuerverzinken



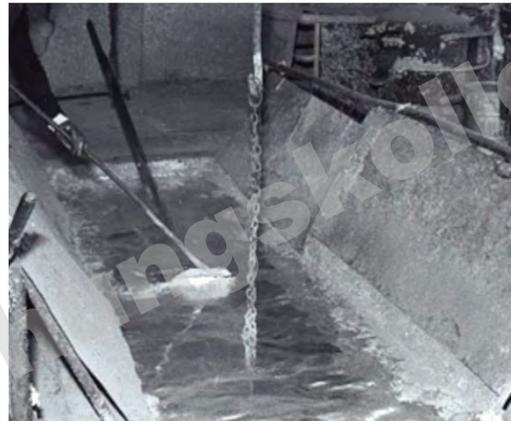
Feuerverzinken – Bauteile und Kessel



1958



1960



1972



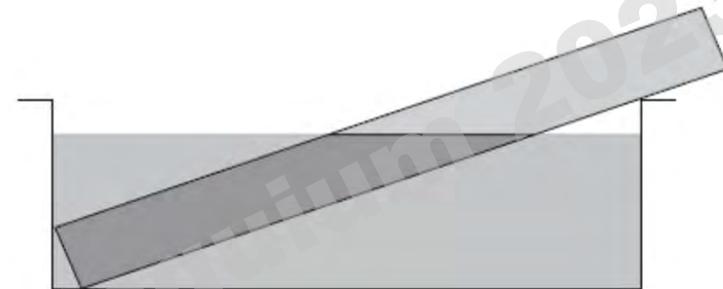
1987

archiv-morschen.de

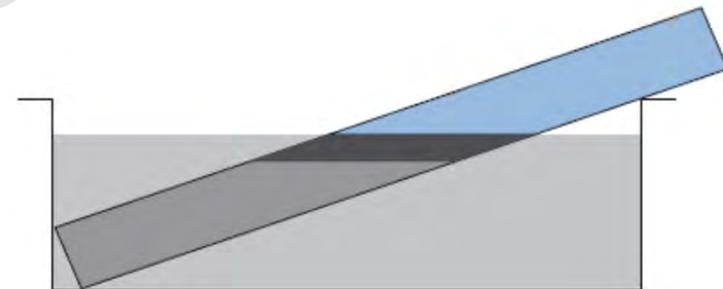
Feuerverzinken – Bauteile und Kessel



verzinkerei-wollerau.ch



1. Tauchung



2. Tauchung

Feuerverzinken – Bauteile und Kessel

- Kesselwand niedrig legiert, bspw.
 - $C \leq 0.1 \%$, $P \leq 0.03 \%$, $Si \leq 0,03 \%$
 - $t = 50 \text{ mm}$
- Bei Al- oder Mg- legierten Schmelzen:
 - Ggfs. Chrom- und nickelhaltige Schweißplattierung



mostostal.siedlce.pl



pilling.de

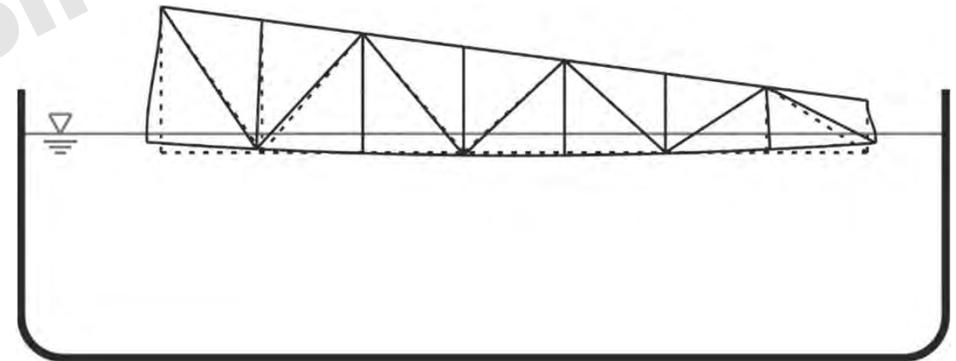
- Größte Kessel derzeit bei ca. $L \times B \times H = 19,0 \times 2,0 \times 3,5 \text{ m}$, 750 t Zn

Feuerverzinken – Bauteile und Kessel

- Kesselwand niedrig legiert, bspw.
 - $C \leq 0.1 \%$, $P \leq 0.03 \%$, $Si \leq 0,03 \%$
 - $t = 50 \text{ mm}$
- Bei Al- oder Mg- legierten Schmelzen:
 - Ggfs. Chrom- und nickelhaltige Schweißplattierung



mostostal.siedlce.pl



- Größte Kessel derzeit bei ca. $L \times B \times H = 19,0 \times 2,0 \times 3,5 \text{ m}$, 750 t Zn

Feuerverzinken – Bauteile und Kessel

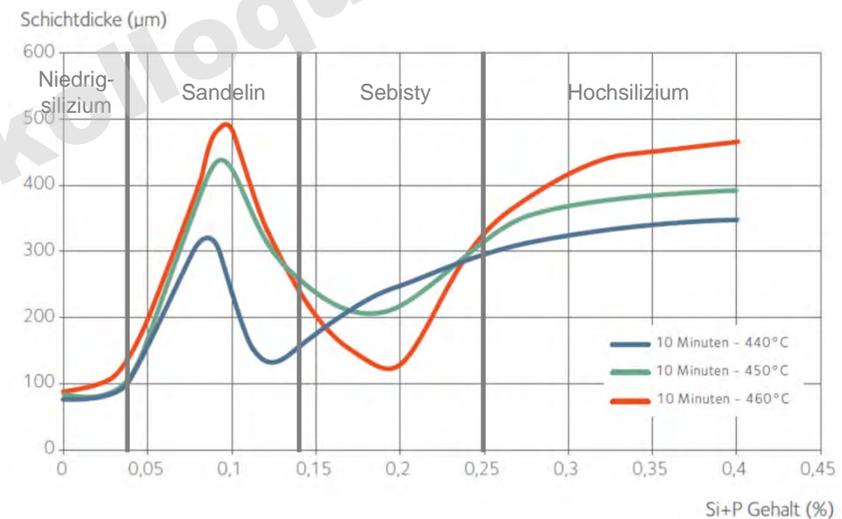
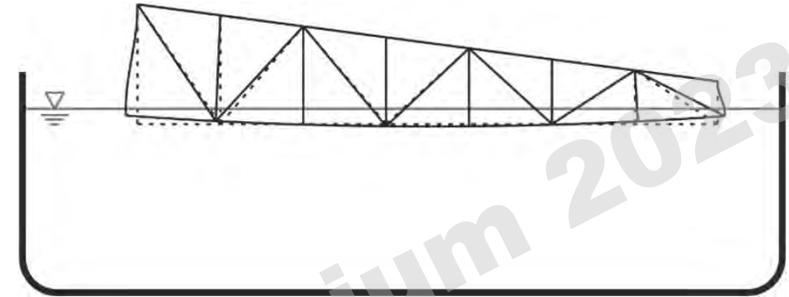
Größere Bauteile

- höhere Profile
- größere Blechdicken und Blechdickensprünge
- höheres Schweißnahtvolumen
- komplexere Bauteile
- Baustahllegierungen
- etc.

jedoch

- schwieriger zu verzinken
- Verzug
- innere Spannungen und Dehnungen
- längere Verweilzeiten
- höhere Zinkschichtdicken, höherer Zinkverbrauch
- Optik, etc.

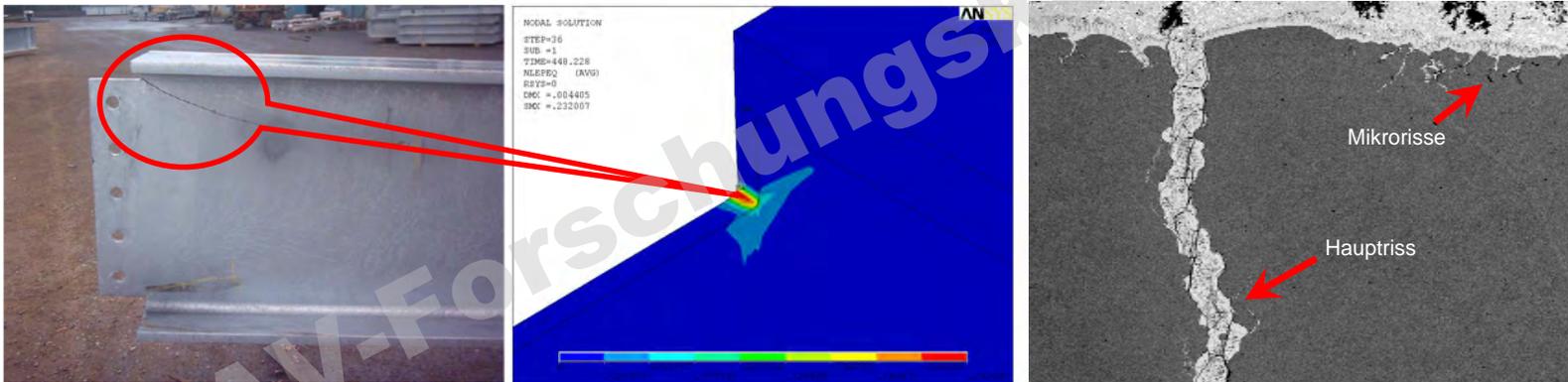
→ Parameteränderungen



Feuerverzinken – Entwicklungen

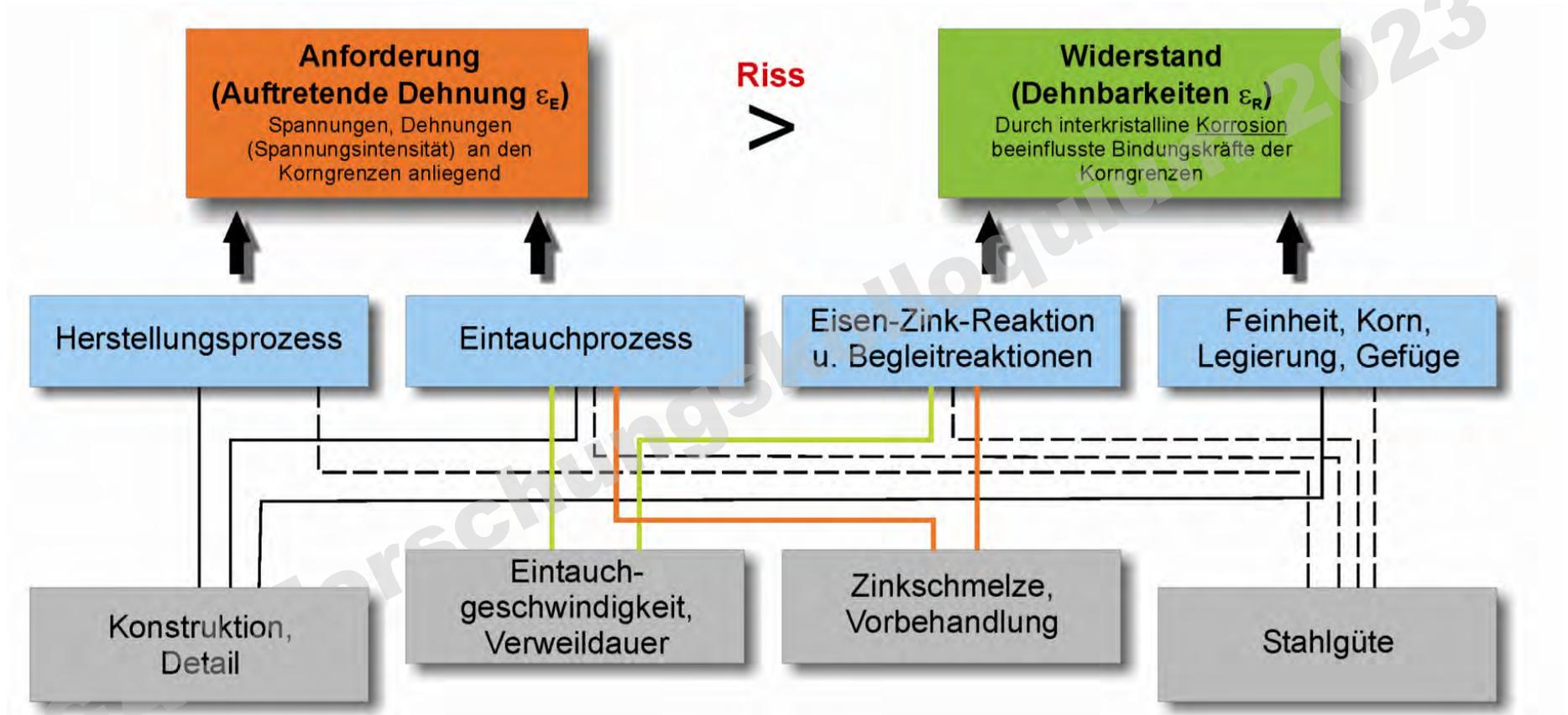
Parameteränderungen, Beispiel

- Große Bauteildimensionen, Zinkverbrauch, Optik
 - 2000: GALVECO → 96,35% Zn, 2,75% Sn, 0,40% Bi, 0,5% Ni
 - 1998: DIN EN ISO 1461: andere Metalle als Zink bis zu 2% → z.B. 98% Zn, 1% Sn, 1% Pb

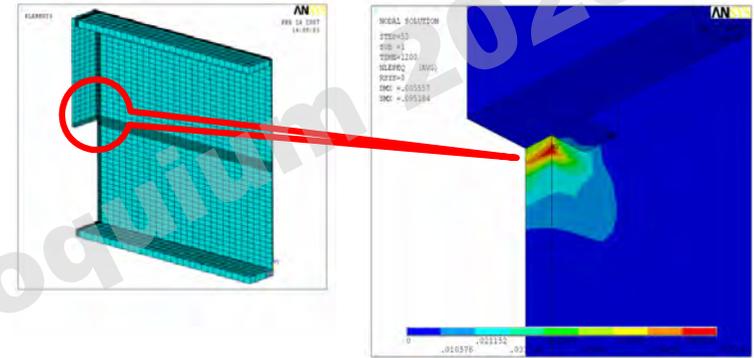
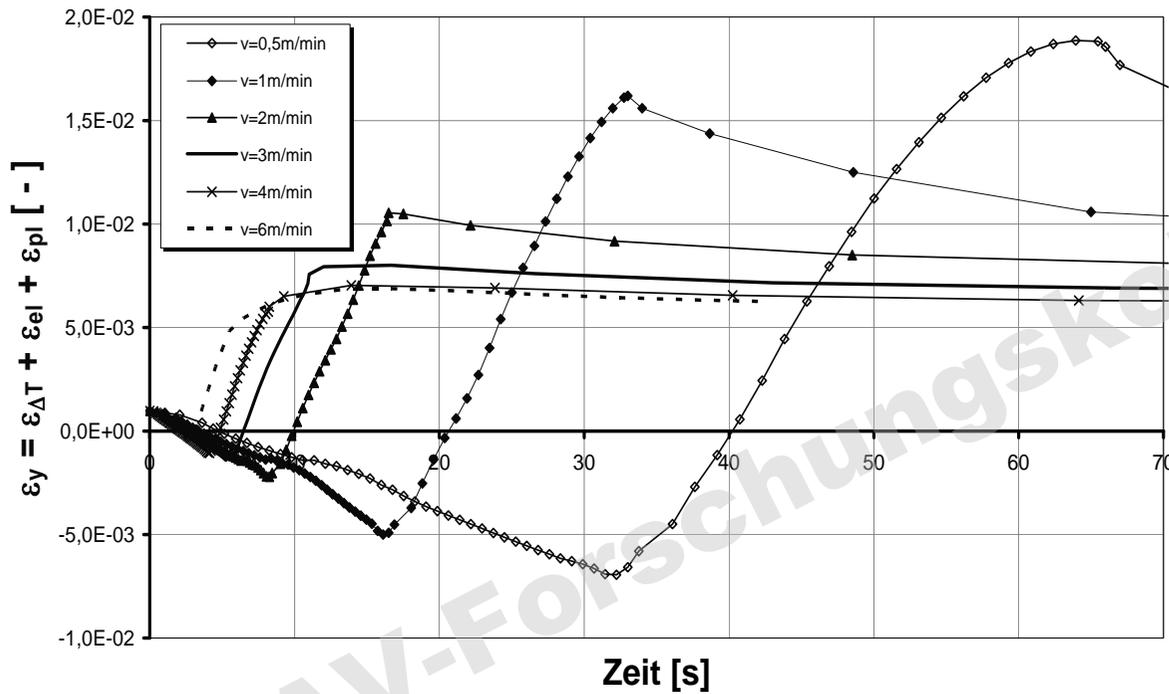




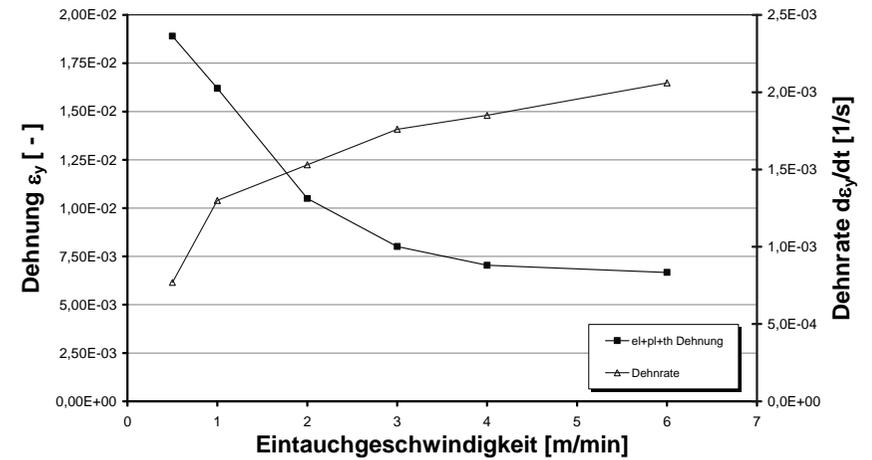
DASt Richtlinie 022



Einfluss der Eintauchgeschwindigkeit auf die Dehnungsentwicklung
 ($T_{\text{zink}}=450^\circ\text{C}$, $T_v=100^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{ü}}=6000\text{W/m}^2\text{K}$)



Abhängigkeit: Dehnung - Dehnrate - Eintauchgeschwindigkeit
 (IPE550, S460, in Stegmitte, 6,5mm unterhalb KP, $T_{\text{zink}}=450^\circ\text{C}$, $T_v=100^\circ\text{C}$, $t_{\text{KP}}=12,5\text{mm}$, $\alpha_{\text{ü}}=6000\text{W/m}^2\text{K}$)



1. Zinklegierung und Flussmittel

Zinkbad-Klasse (Standard)	Zinkschmelzanteile (Gew.-%)				
	Sn	Pb + 10 Bi	Ni	Al	Summe weiterer Elemente (ohne Zn + Fe)
1	≤ 0,1	≤ 1,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1

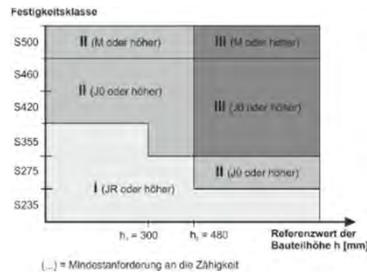
Salzgehalt ≥ 350 g/l

DAST Richtlinie 022 – wichtigste Regelungen

2. Konstruktionsklasse

Vorherrschende Trägerhöhe:	$h \leq 300$ mm
	$300 \text{ mm} < h \leq 480$ mm
	$h > 480$ mm
Festigkeit:	S235 – S500
Zähigkeit:	JR; J0; J2; N; M

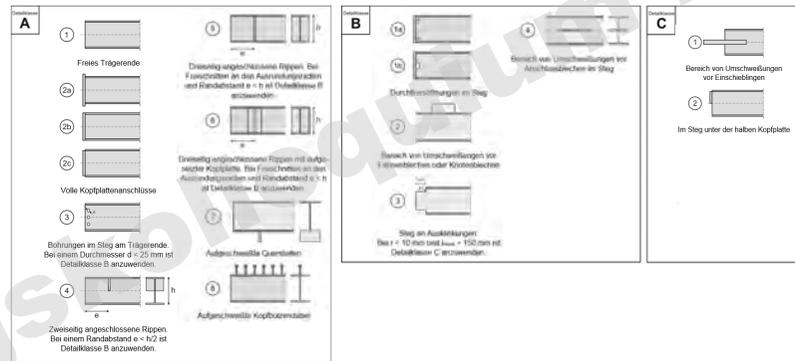
Konstruktionsklasse I, II, III



3. Detailklasse

Detailausbildung: Ausbildung des Trägerendes, Steifen, etc.

Detailklasse A, B, C



4. Verweildauer und Eintauchgeschwindigkeit

Maximale Verweildauer		
Konstruktionsklasse	Referenzwert der Erzeugnisdicke $t_{ref} \leq 30$ mm	$t_{ref} > 30$ mm
I, II, III	Kein weiterer Nachweis	Verweildauer < 27 min

$V \geq 0,8$ m/min

5. Vertrauenszonen

- VZ 1: Sichtprüfungen
- VZ 2: stichprobenhafte Prüfungen mit MT
- VZ 3: systematische Überprüfung

Vertrauenswahrscheinlichkeit für Rissfreiheit im Grenzzustand "Eintauchen"			
Konstruktionsklasse	Detailklasse	A	B
I		Vertrauenszone 1	Vertrauenszone 2
II			
III		Vertrauenszone 2	Vertrauenszone 3

DASSt Richtlinie 022

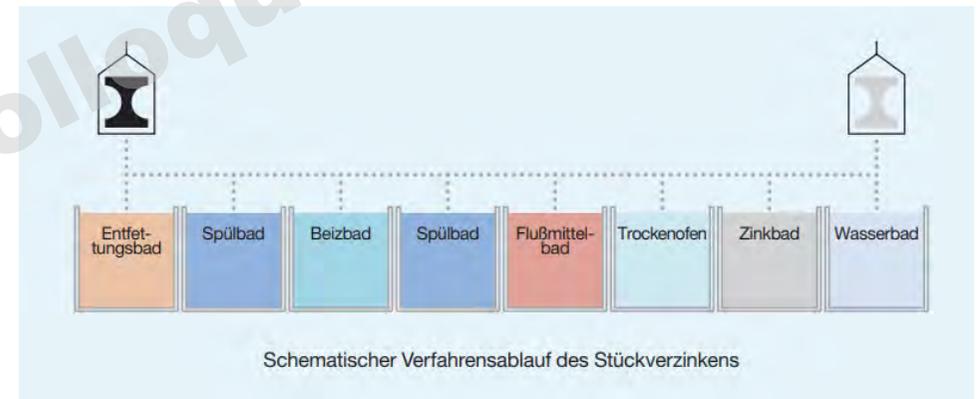


Häufung von Risschäden	Erstauflage der DASSt-Ri 022	1. Revision DASSt-Ri22 Hochtemperaturverzinken, Flussmittel, Fachwerke, ...	2. Revision DASSt-Ri 022 hochfester Stahl ?, neue Legierungen ?, ...
<p>Two photographs showing steel beams with visible cracks. The top photo shows a beam on a roof with a crack highlighted by a yellow arrow. The bottom photo shows a beam joint with a crack highlighted by a red dashed line.</p>	<p>Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen Erläuterung zur DASSt-Richtlinie 022 Ausgabe Juli 2010</p>	<p>Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen DASSt-Richtlinie 022 und Erläuterung zur DASSt-Richtlinie 022 Ausgabe Juni 2016</p>	

Feuerverzinken – quo vadis?

Markanteile der Feuerverzinkung im Stahlbau sichern und ausbauen

- Verfolgung der Stahlbautrends
 - Bauteildimensionen
 - Hochfeste Stahlgüten
 - architektonische Anforderungen, etc.
- Nutzung weiterer Eigenschaften (Brandwiderstand)
- Neue Marktfelder: **Brückenbau, Ingenieurbau**
- **Fügen verzinkter Bauteile**
- Nachhaltigkeit (incl. Circular Economy)



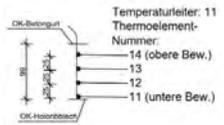
Industrieverband Feuerverzinken

→ Verfolgung neuer Entwicklungen: Blick auf das gesamte Parameterfeld

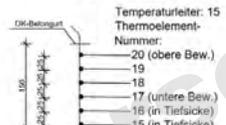
Feuerwiderstand von feuerverzinkten Verbundträgern



Elementleiter
Hochsicke
(Nrn.: 11, 21, 31, 41, 51,
61, 91, 101, 111)



Elementleiter
Tiefsicke
(Nrn.: 15, 25, 35, 45, 55,
65, 95, 105, 115)



Feuerwiderstand von feuerverzinkten Verbundträgern

Normen und Regelwerke

- DASt-Richtlinie 027: „Ermittlung der Bauteiltemperatur feuerverzinkter Stahlbauteile im Brandfall“
- DIN EN 1993-1-2: „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall“

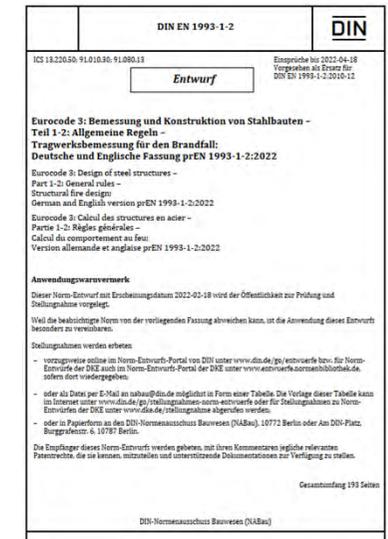
5.2.1.1 Emissivitätskoeffizient

(1) Zusätzlich zu prEN 1991-1-2:2021, 5.1(6), dürfen die Werte der Oberflächenemissivität ϵ_m in Bezug auf unterschiedliche Stahlsorten nach Tabelle 5.1 angesetzt werden:

Tabelle 5.1 — Werte der Oberflächenemissivität ϵ_m

Stahlsorte	$\epsilon_m (\leq 500 \text{ °C})$	$\epsilon_m (> 500 \text{ °C})$
Kohlenstoffstahl	0,7	
HDG-Stahl ^a	0,35	0,7

^a Nach EN ISO 1461 feuerverzinkter Stahl mit einer Stahlzusammensetzung entsprechend Kategorie A oder B nach EN ISO 14713-2, Tabelle 1.



Brückenbau



Stahlverbundbrücke, A44 (Bischhausen, Deutschland)



Stahlverbundbrücke, Nete-Kanal (Lier, Belgien)



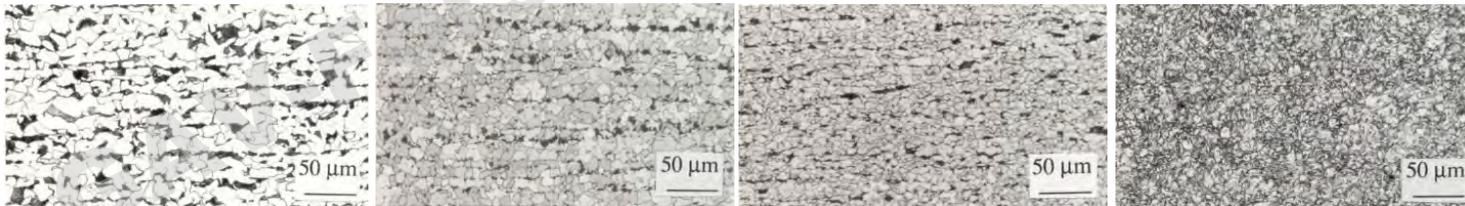
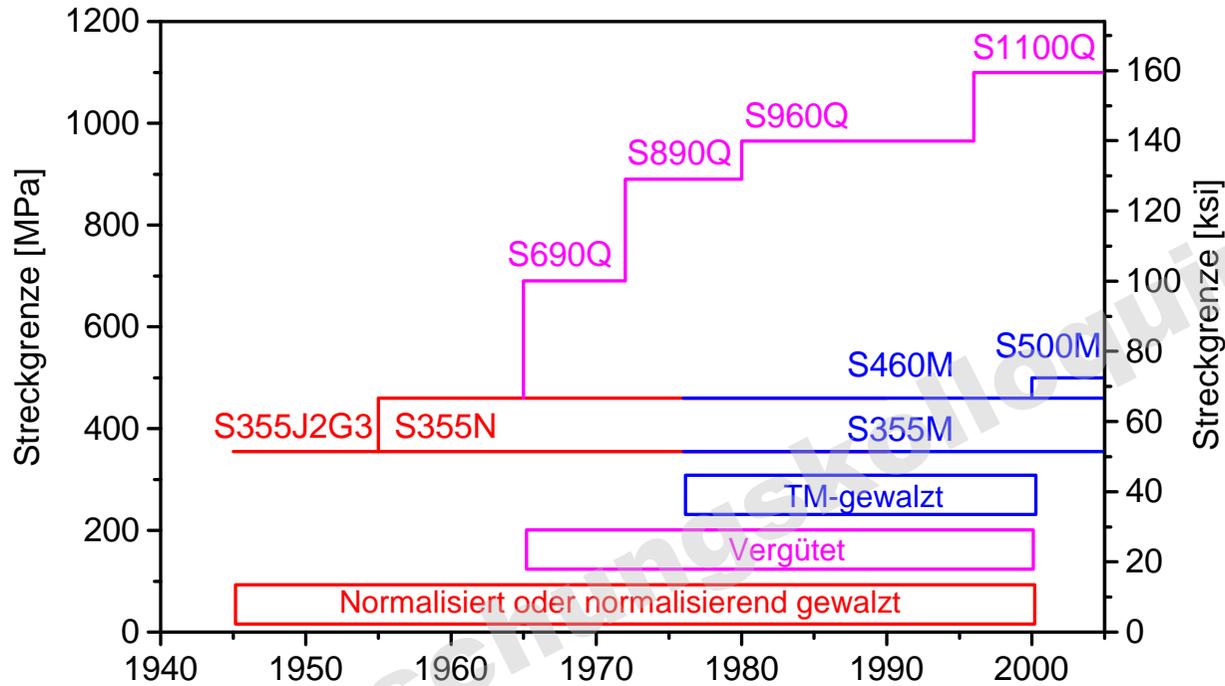
Fußgängerbrücke (Allgäu, Deutschland)



Fußgängerbrücke (Königgrätz, Tschechien)

Bildquellen: feuerverzinken.com

Hochfeste Baustähle



S355J

S355N

S460M

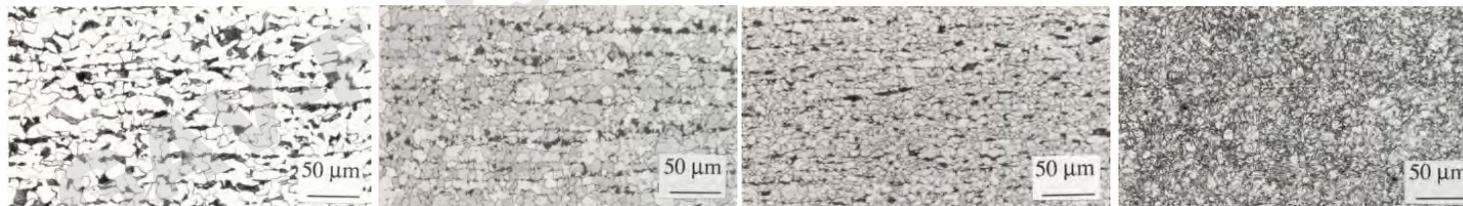
S690Q

Konventionell

- Festigkeitssteigerung durch höhere spez. C- und Mn- Gehalte
- Relativ grobes Korn
 - S235, S355

Feinkornbaustähle

- Festigkeitssteigerung durch Feinkornbildung, dadurch spez. C- und Mn- Gehalte geringer
- Feinkornbildung durch
 - Normalisieren (S355, S420, S460)
 - Thermomechanisches Walzen (S460, S500, S700)
 - Vergüten (S500, S690, S890, ...)
 - verschiedenste Mikrolegierungen etc.

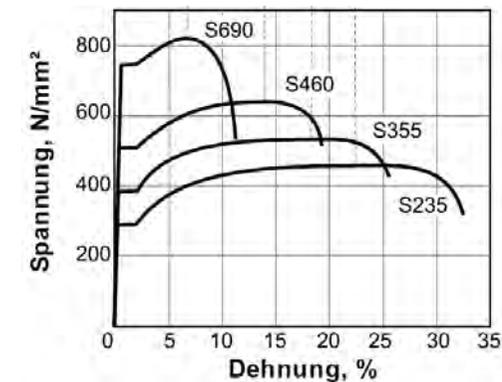


S355J

S355N

S460M

S690Q

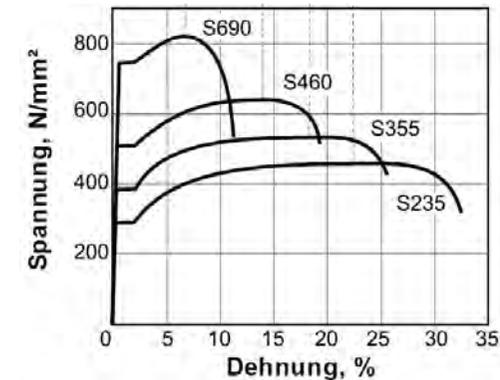
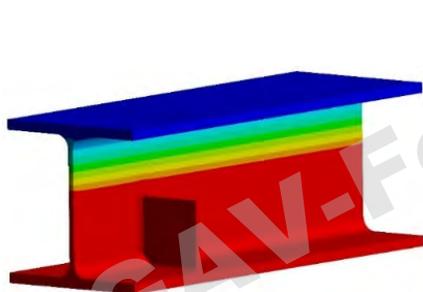


Konventionell

- Festigkeitssteigerung durch höhere spez. C- und Mn- Gehalte
- Relativ grobes Korn
 - S235, S355

Feinkornbaustähle

- Festigkeitssteigerung durch Feinkornbildung, dadurch spez. C- und Mn- Gehalte geringer
- Feinkornbildung durch
 - Normalisieren (S355, S420, S460)
 - Thermomechanisches Walzen (S460, S500, S700)
 - Vergüten (S500, S690, S890, ...)
 - verschiedenste Mikrolegierungen etc.



Hochfeste Baustähle – Seiltausch Fehmarnsundbrücke $f_y=700$ MPa, DIN EN 10340



Bezeichnung		Wärmebehandlung ^a		Dicke <i>t</i> mm	Zugversuch bei Raumtemperatur			Kerbschlagbiegeversuch ^b		
Kurzname	Werkstoffnummer	Symbol ^c	Normalglühen oder Austenitisieren °C		Anlassen °C	$R_{p0,2}$ MPa ^d	R_m MPa ^d	A %	KV J	Temperatur °C
G18NiMoCr3-6	1.6759	+QT1	900 bis 960 ^g	580 bis 620	$t \leq 80$	700	830 bis 980	12	27	-40
GX4CrNi13-4	1.4317	+QT	1 000 bis 1 050	590 bis 620	$t \leq 300$	570	760 bis 960	15	50	RT ^f
GXCrNiMo16-5-1	1.4405	+QT	1 020 bis 1 070	580 bis 630	$t \leq 300$	540	760 bis 960	15	60	RT ^f
GX2CrNi19-11	1.4309	+AT ^h	1 050 bis 1 150	–	$t \leq 150$	185	440 bis 640	30	80	RT ^f
GX2CrNiMo19-11-2	1.4409	+AT ^h	1 080 bis 1 150	–	$t \leq 150$	195	440 bis 640	30	80	RT ^f
GX2CrNiMoN25-6-3	1.4468	+AT ^h	1 120 bis 1 150	–	$t \leq 150$	480	650 bis 850	22	50	RT ^f

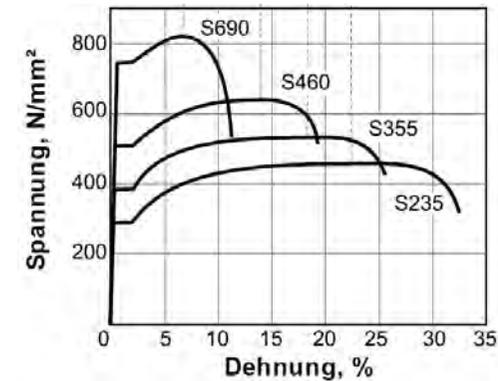
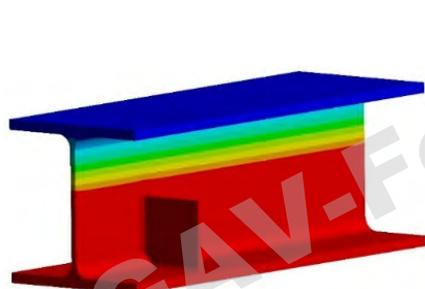


Hochfeste Baustähle

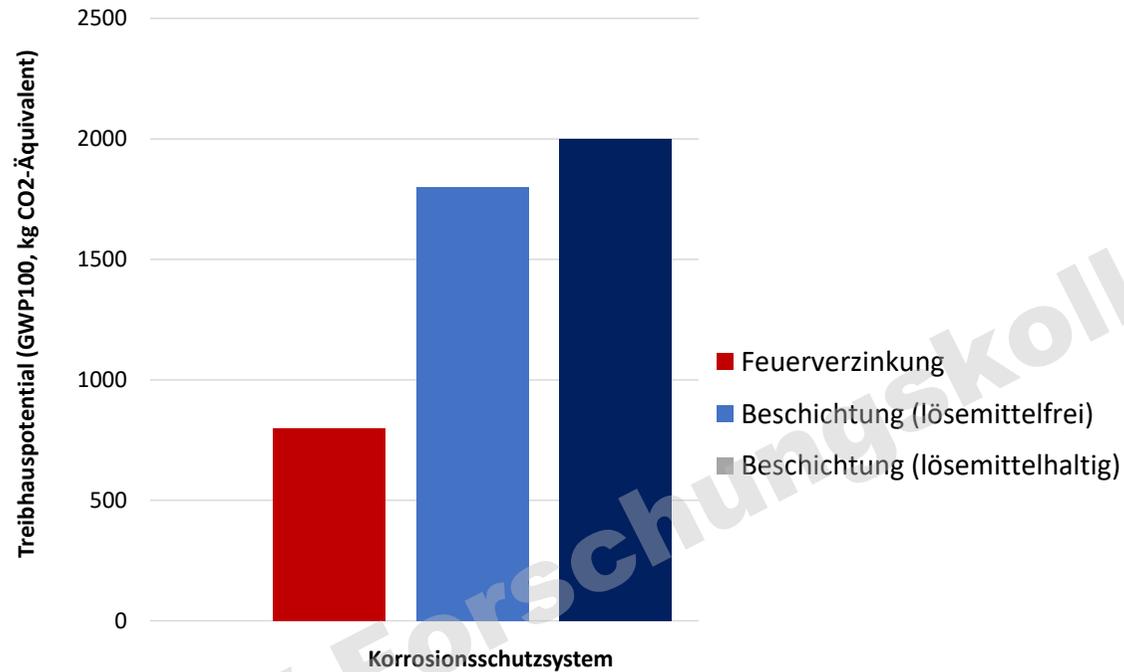
?

Zinkbad-Klasse (Standard)	Zinkschmelzanteile (Gew.-%)				
	Sn	Pb + 10 Bi	Ni	Al	Summe weiterer Elemente (ohne Zn + Fe)
1	≤ 0,1	≤ 1,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1

→ Forschungsprojekt
ZinkHochFit –IGF 22912N



Feuerverzinken – Nachhaltigkeit



Industrieverband Feuerverzinken –
Leitfaden "Feuerverzinkter Stahl und nachhaltiges Bauen"

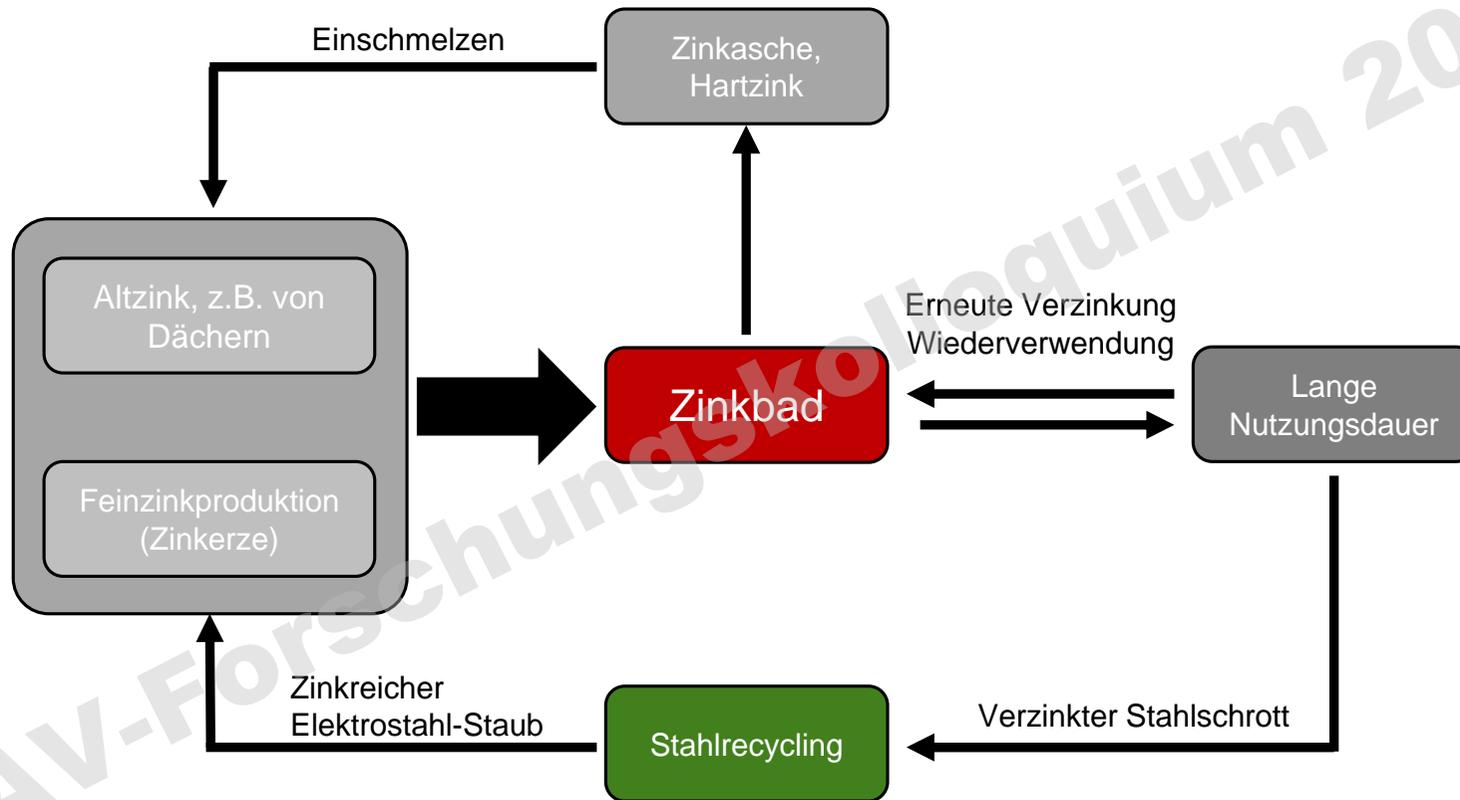


buitink-technology.com



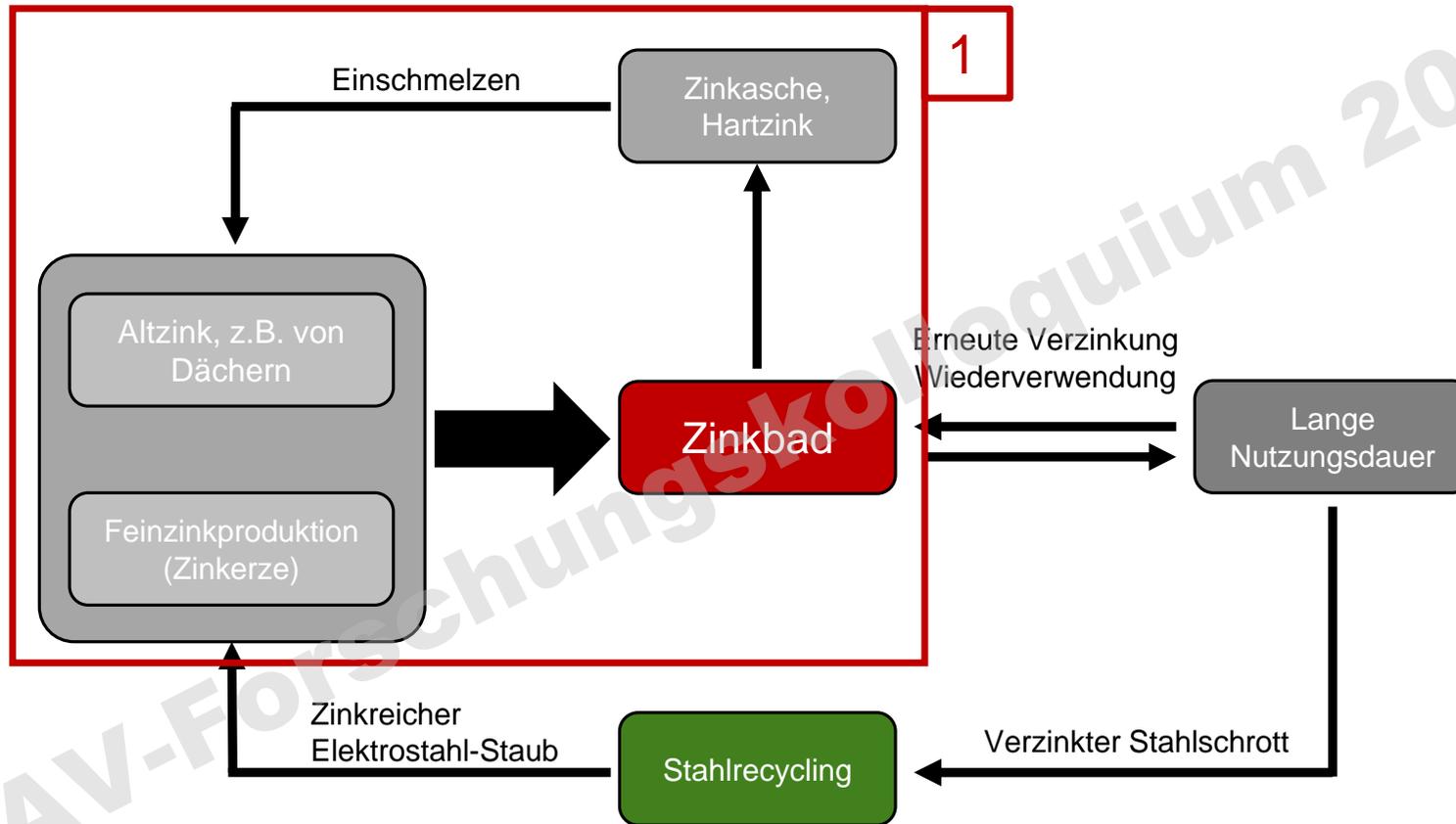
MFO-Park Oerlikon (Zürich, Schweiz) [wikimedia.org](https://www.wikimedia.org)

Feuerverzinken – Nachhaltigkeit: Zirkularität



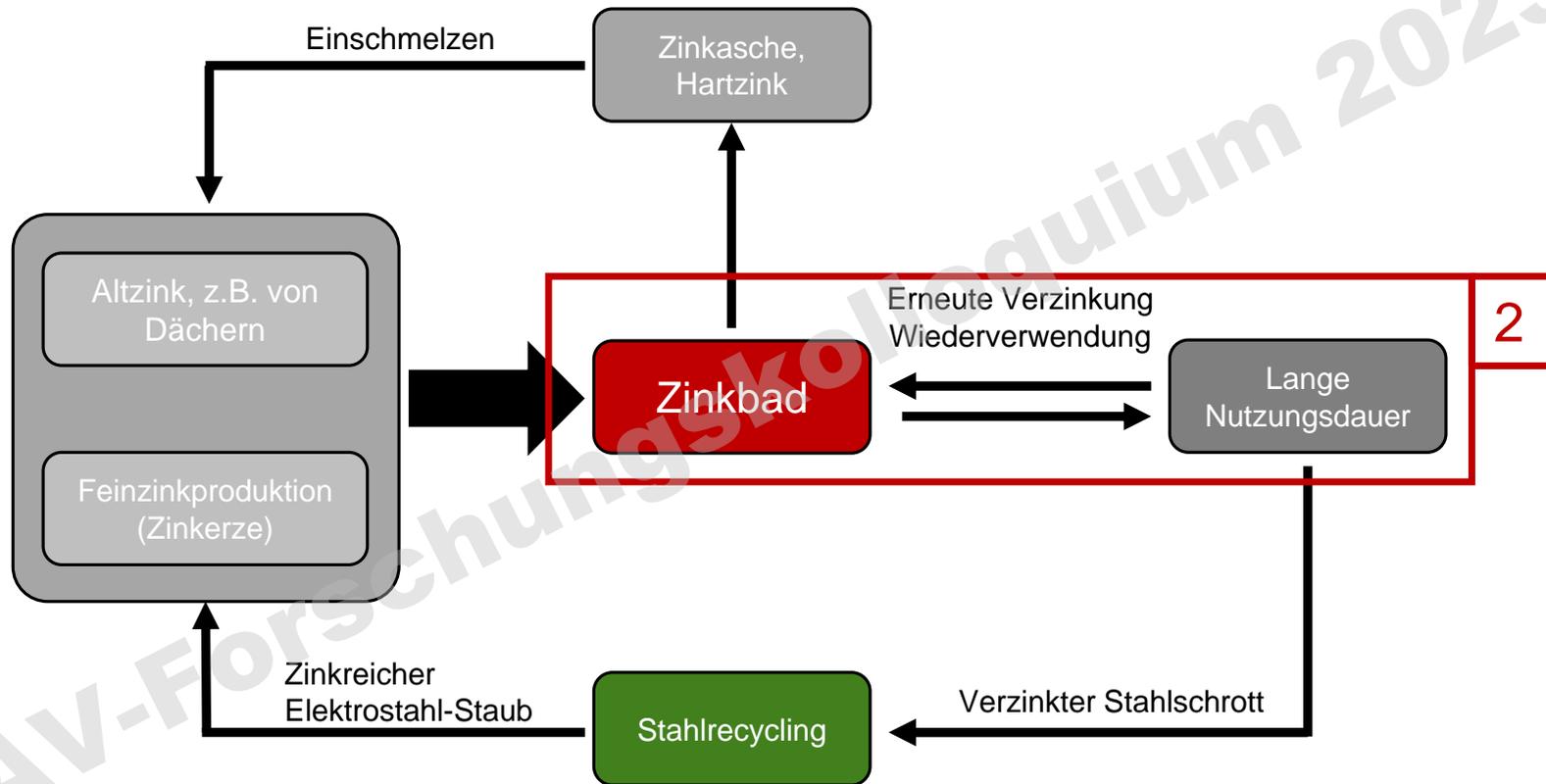
Industrieverband Feuerverzinken –
Leitfaden "Feuerverzinkter Stahl und nachhaltiges Bauen,, (2008)

Feuerverzinken – Nachhaltigkeit: Zirkularität



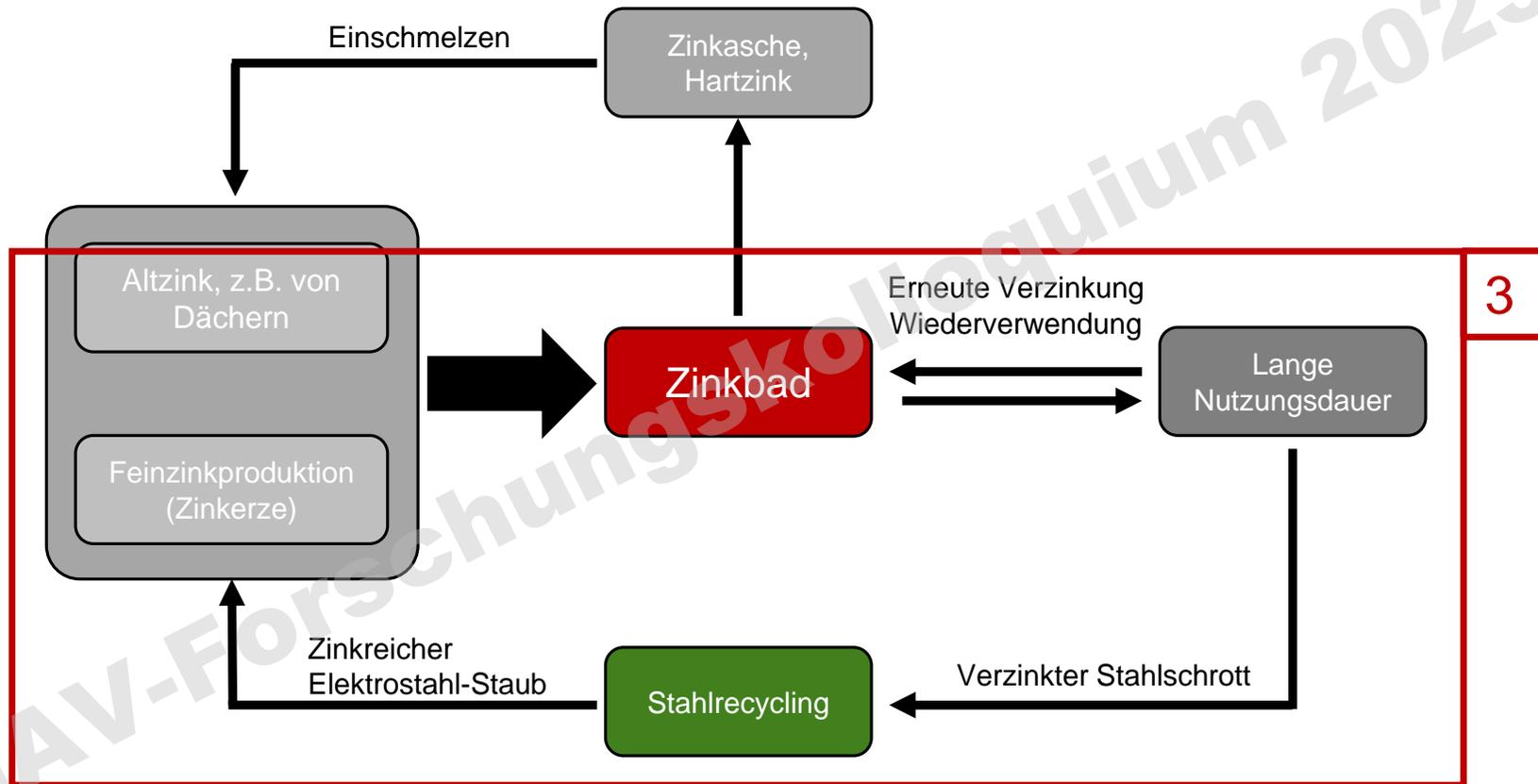
Industrieverband Feuerverzinken –
Leitfaden "Feuerverzinkter Stahl und nachhaltiges Bauen"

Feuerverzinken – Nachhaltigkeit: Zirkularität



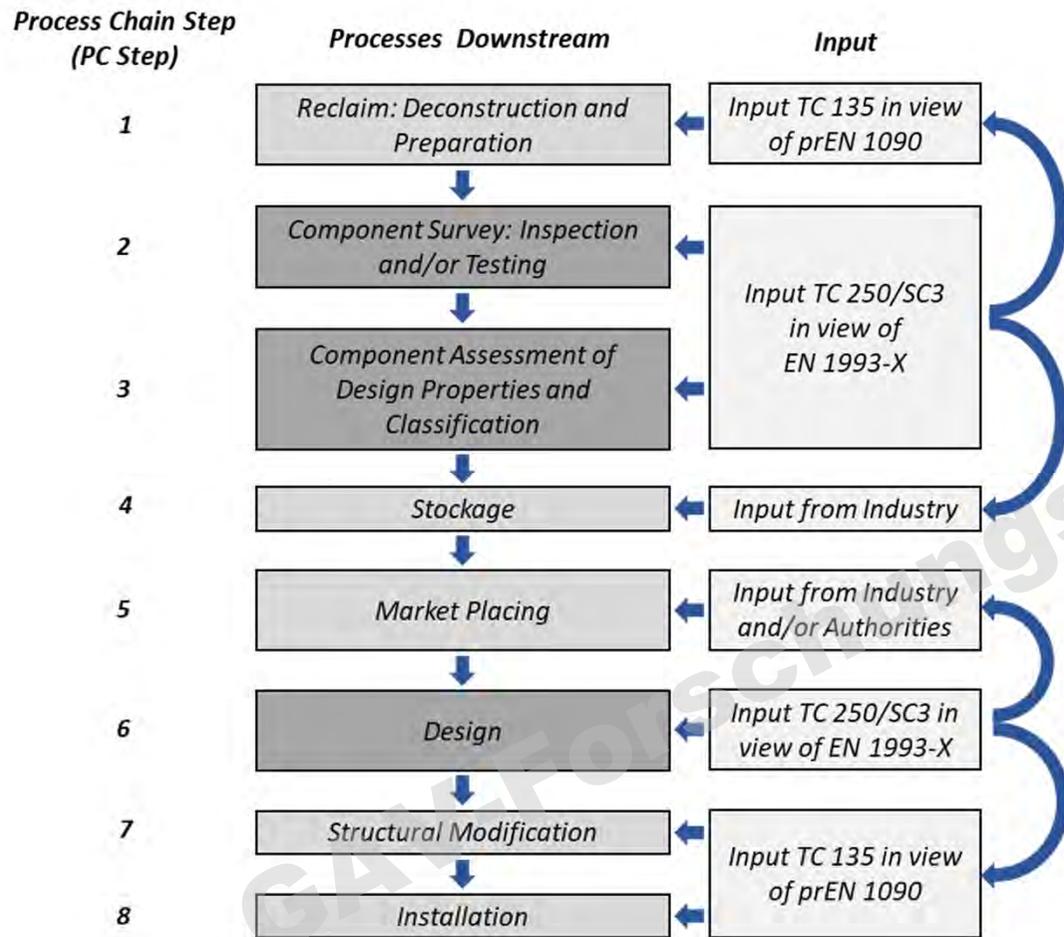
Industrieverband Feuerverzinken –
Leitfaden "Feuerverzinkter Stahl und nachhaltiges Bauen"

Feuerverzinken – Nachhaltigkeit: Zirkularität



Industrieverband Feuerverzinken –
Leitfaden "Feuerverzinkter Stahl und nachhaltiges Bauen"

Feuerverzinken – Nachhaltigkeit: Zirkularität

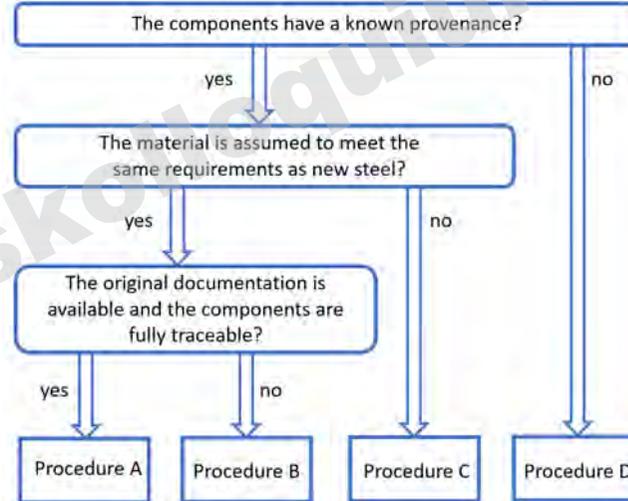
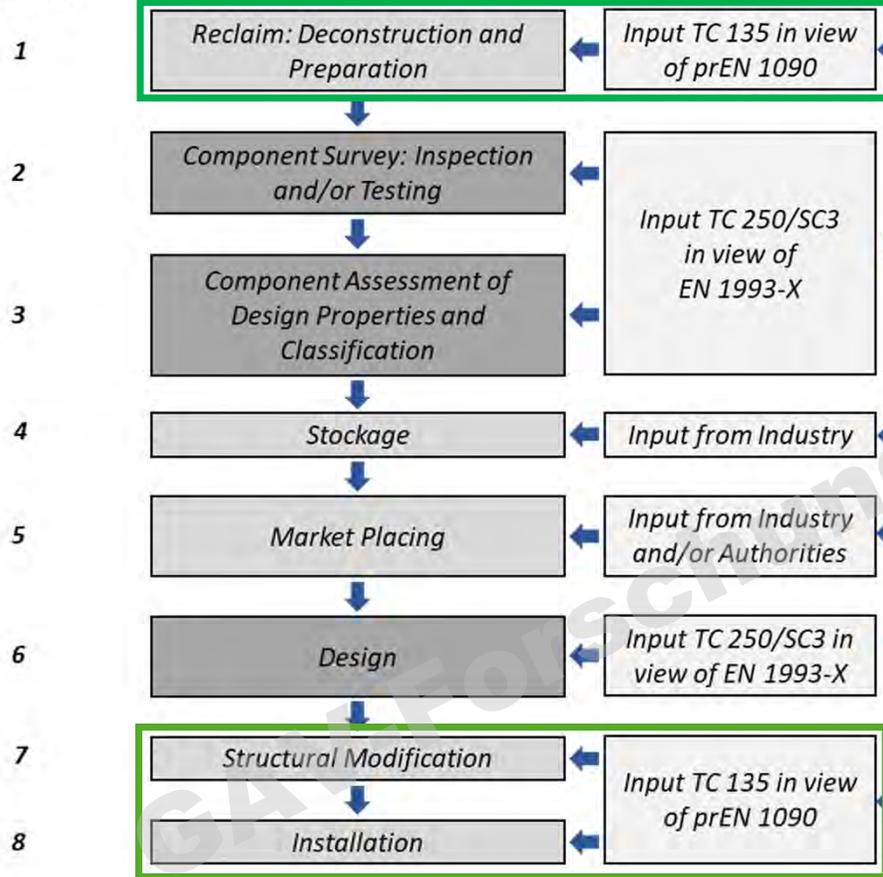


Feuerverzinken – Nachhaltigkeit: Zirkularität – CEN/TC135

Process Chain Step
(PC Step)

Processes Downstream

Input



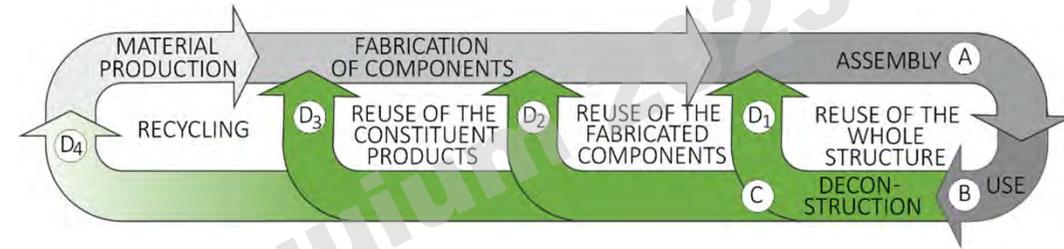
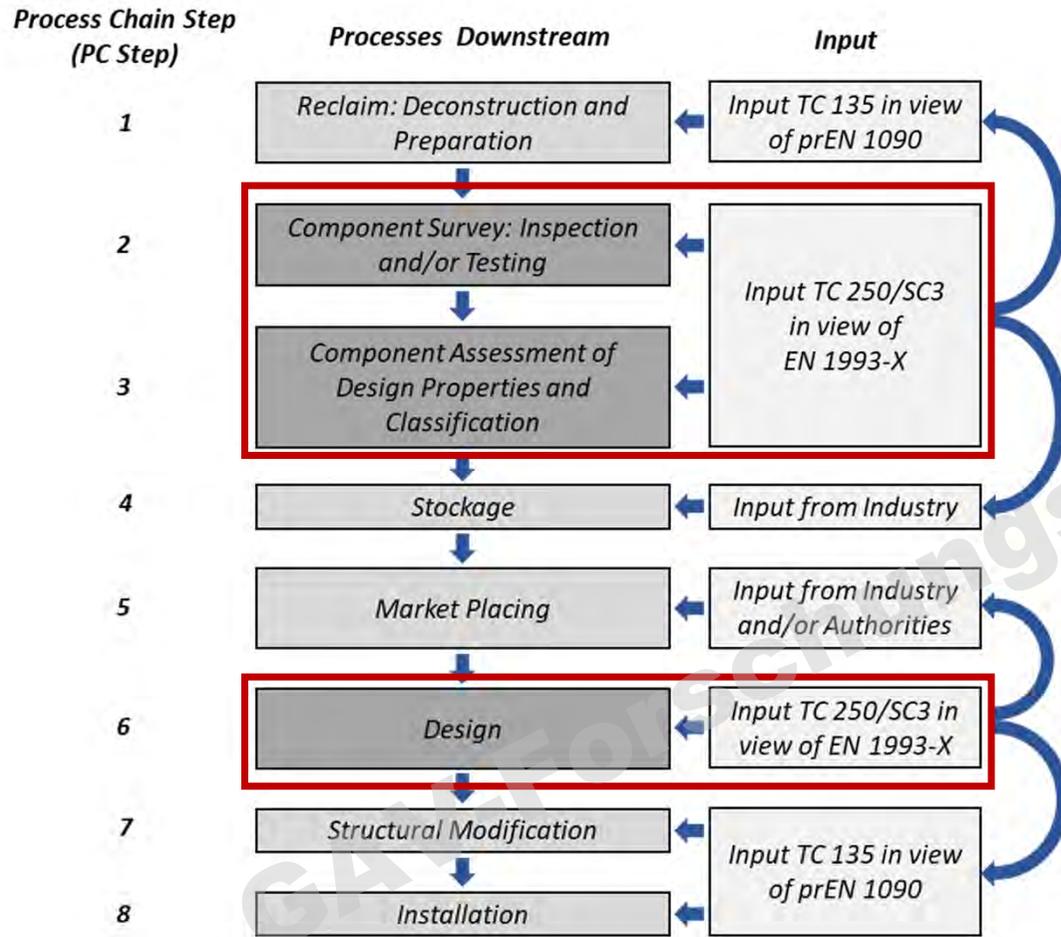
CEN/TC 135
Date: 2022-06-03
PrEN/TS 1090-XXX: 2022
Secretariat: TR

Execution of steel structures and aluminium structures — Steel structures — Part xxx: Reuse of structural steel
Anführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Stahltragwerken — Teil xxx: Wiederverwendung von Baustahl
Execution des structures en acier et des structures en aluminium — Structures en acier — Partie xxx: Réutilisation des aciers de construction

ICS:

CCMC will prepare and attach the official info page.

Feuerverzinken – Nachhaltigkeit: Zirkularität – CEN/TC250/SC3/WG1



Zusammenfassung

- Feuerverzinken – **der** Korrosionsschutz für den Stahlbau
- Stahlbautrends und Aspekte
 - Abmessungen
 - Hochfeste Stahlgüten
 - Nutzung weiterer Eigenschaften - Brandschutz
 - Neue Produkte im Brücken- und Ingenieurbau - Fügeproblem
 - Nachhaltigkeit, Zirkularität
 - etc.
- Feuerverzinken – **der** Korrosionsschutz mit Potential



GAV-Forschungskolloquium 2023

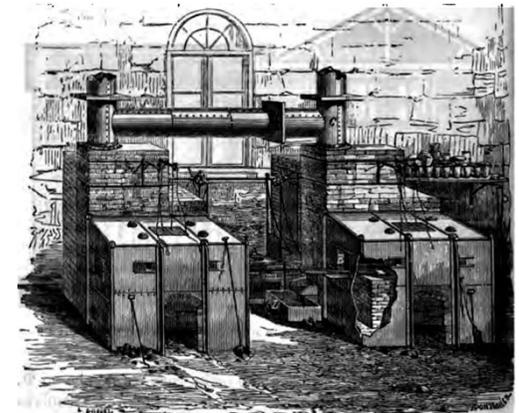
Von der Erfindung zur Manufaktur

- 1742 MALOUIN – Methode der Zinkbeschichtung von Eisen durch Eintauchen in Zink
- 1824 DAVY – kathodischer Korrosionsschutz durch Anbringen von Zinkplatten
- 1836 SOREL – Verfahren zum Reinigen von Stahloberflächen

- 1840 Erste Feuerverzinkereien in Frankreich, England u. Deutschland
- 1860 Patentanmeldung kontinuierliches Verzinken
- 1880 Entwicklung galvanotechnischer Verfahren



Paul Jacques MALOUIN



SOREL'S Entwurf für einen Zinkoxid-Ofen

wikimedia.org (oben), Spennemann - Stanislas Sorel's zinc-based paints (2020) (unten)