

## AUS FORSCHUNG UND TECHNIK

### **Korrosionsbeständigkeit von nachbehandelten Schweißverbindungen feuerverzinkter Stahlkonstruktionen bei atmosphärischer Belastung**

Ergebnisse eines 25-jährigen Langzeitversuches

Bericht Nr. 146  
des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.  
GAV-Nr. FG 7

---

Die Untersuchungen wurden teilweise vom Bundesminister für Wirtschaft (BMWi) und von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) gefördert.

# Korrosionsbeständigkeit von nachbehandelten Schweißverbindungen feuerverzinkter Stahlkonstruktionen bei atmosphärischer Belastung

Ergebnisse eines 25-jährigen Langzeitversuches

## 1. Zusammenfassung

*An Schweißverbindungen an feuerverzinkten Rechteck-Hohlprofilen wurde die Korrosionsschutzwirkung von unterschiedlichen Nachbehandlungen (Farb-Beschichten, Thermisches Spritzen mit Zink, Ausbesserung im Lötverfahren) – vorausgegangen waren Oberflächenvorbehandlungen durch Handentrostung oder Korundstrahlen – mehr als 4-, 8- und 25-jähriger Auslagerung untersucht. Die Auslagerung fand während der ersten 8 Jahren in verschiedenen Klimagebieten und in den danach folgenden 17 Jahren an zentraler Stelle statt.*

*Die angewendeten Korrosionsschutzmaßnahmen führten zu folgenden Bewertungen:*

*Handentrostung als Oberflächenvorbehandlung für nachfolgende Korrosionsschutzbeschichtungen ist einer Strahlentrostung mit Korund deutlich unterlegen;*

*Einfachbeschichtungen erbringen einen unzureichenden Korrosionsschutz; Zweifach-Beschichtungen verhalten sich zwar erwartungsgemäß besser, versagen jedoch auch spätestens innerhalb von 8 Jahren;*

*die Korrosionsschutzwirkung der untersuchten Lötüberzüge ist unbefriedigend und der Feuerverzinkung nicht annähernd vergleichbar.*

*Zinkspritzüberzüge kommen in ihrer Schutzwirkung der Feuerverzinkung am nächsten, innerhalb des untersuchten Zeitraumes sind jedoch nur geringe Vorteile einer zusätzlichen Beschichtung zu erkennen;*

*Farbbeschichtungen unterschiedlichster Zusammensetzung und ebenso Ausbesserungslote hatten bereits nach 4 bzw. spätestens nach 8 Jahren versagt. Lediglich die thermisch gespritzten Zinküberzüge wiesen noch nach 25 Jahren einen akzeptablen Zustand auf, wobei jedoch nunmehr auch erkennbar wurden, daß sich die Schutzdauer dieser Systeme dem Ende neigten.*

## 2. Ausgangspunkt

Im Jahre 1974 wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes feuerverzinkte Stahl-Hohlprofile auf verschiedenen Korrosionsprüfständen in Deutschland ausgelegt, um das Langzeitverhalten von Systemen zur Ausbesserung von Schadstellen im Zinküberzug an

feuerverzinkten Stahlteilen zu untersuchen. Hierzu sollten nicht nur Erfahrungen über die Schutzdauer von unterschiedlichen Ausbesserungssystemen für Zinküberzüge an Schweißnähten gewonnen werden, die hierbei gewonnenen Erfahrungen sind allgemein auf die Wirksamkeit von Ausbesserungsverfahren für Fehlstellen in Zinküberzügen, die durch das Verfahren der Stückverzinkung hergestellt werden, anzuwenden.

In einem Forschungsprojekt, das mit Mittel der Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigung gefördert wurde, hat man mit Auslagerungsversuchen im Jahre 1974 begonnen. Die Proben wurden zunächst jährlichen und später zweijährlichen Kontrollen unterzogen. Eine erste Auswertung von Zwischenergebnissen fand Anfang 1979, also nach mehr als 4 Jahren Versuchsdauer statt, da dort bereits wichtige Erkenntnisse vorlagen [1]. Im Jahre 1983 wurde eine weitere zusammenfassende Darstellung veröffentlicht und über die bis dahin vorliegenden Ergebnisse wurde ebenfalls berichtet [2].

Bis zu diesem Zeitpunkt waren bereits viele Ausbesserungssysteme ausgefallen. Man entschloß sich daraufhin, die Versuchsreihe mit den noch verbliebenen, intakten Proben an einer zentralen Stelle weiterzuführen. Die Proben, die zunächst an verschiedenen Standorten in Deutschland auf Korrosionsprüfständen ausgelagert waren, wurden daraufhin auf dem Prüfstand des Mannesmann-Forschungsinstitutes in Duisburg-Huckingen ausgelagert. Dort verblieben die Proben bis zum Jahre 2000, danach wurden die Auslagerung beendet. Im Jahre 1999, also nach 25 Jahren Auslagerungszeit der Proben erfolgte eine letzte Auswertung.

## 3. Zweck der Versuche

Durch diese Untersuchung sollten optimale Verfahren und/oder Systeme mit besonderer Eignung für den Korrosionsschutz von Schweißverbindungen an Stahlbauwerken aus feuerverzinkten Bauteilen ermittelt werden, die beispielsweise aus Abmessungsgründen in den zur Verfügung stehenden Verzinkungskesseln nicht in einem Stück verzinkt werden können. Ebenso sind Transport- und Montageprobleme Anlässe zur Verzinkung von Teilstücken, die dann zu einem späteren Zeitpunkt zu größeren Einheiten verschweißt werden.

Im Bereich der Schweißnaht erfährt der Zinküberzug durch Oxidation, Verdampfung oder strukturelle Umwandlung eine Minderung seiner

Korrosionsschutzeigenschaften. Die Schweiße selbst ist zudem ohne Korrosionsschutz. Eine Nachbesserung ist unerlässlich; dabei ist eine der Güte der Feuerverzinkung vergleichbare Schutzwirkung anzustreben.

Im Hinblick auf die Proben ist anzumerken, daß einige Systeme heute nicht mehr im Handel erhältlich sind; andere wiederum sind in ihrer Rezeptur und ihrer Zusammensetzung verändert worden. Aus diesem Grunde lassen sich nicht alle Aussagen auf die heutigen Verhältnisse unmittelbar übertragen. Allerdings zeigen die Ergebnisse Trends und Tendenzen, die in ihrer Grundsätzlichkeit auch heute noch Gültigkeit haben.

#### 4. Versuchsdurchführung

Für eine gute betriebliche Aussagefähigkeit wurden die Proben aus Rechteck-Hohlprofil gefertigt, wie sie als Konstruktionsbauteil vielfältig zur Anwendung gelangen. Rechteckrohrabschnitte wurden zunächst feuerverzinkt und anschließend zu Proben geeigneter Länge verschweißt.

Zum Korrosionsschutz der Schweißnähte und ihrer Umgebung, deren Feuerverzinkung durch die Schweißwärme beeinträchtigt wird, kamen Farb-Beschichtungen sowie Löt- und Metallspritzüberzüge nach unterschiedlicher Vorbehandlung des Untergrundes durch Bürsten oder Strahlen zur Anwendung. Zusätzlich bot dieses Versuchsprogramm die Möglichkeit, das Korrosionsschutzverhalten einer "Duplex-Beschichtung" (das heißt Feuerverzinkung + Beschichtung) auf einer Probenteilfläche unter den gegebenen Klimaverhältnissen zu überprüfen.

#### - Werkstoffe und Probenfertigung

Für die längsnahtgeschweißten Rechteck-Hohlprofile der Abmessung 140 mm x 80 mm x 5 mm wurde ein RSt-35-Warmband verarbeitet (Abb. 1). 200 mm lange Abschnitte wurden nach dem Trockenverzinkungsverfahren mit 3 min Tauchzeit, Badtemperatur 450 °C, feuerverzinkt. Die dabei gebildeten Zinküberzüge waren ca. 77 µm dick. Die Zinküberzüge waren reich an Fe-Zn-Legierungsphase mit teilweise nur dünner Reinzinküberdeckung. Auf großen Teilflächen waren die Zinkschichten mattgrau, weil die Fe-Zn-Phasen bis zur Oberfläche durchgewachsen waren.

Das Aussehen der Proben ist aus Abbildung 1 ersichtlich, ebenso die der Schweiße benachbarte wärmebeeinflusste Zone; sie ist mit Oxiden des Zinks überdeckt. Die Zinkoxidbedeckung wurde vor Durchführung der Ausbesserungsmaßnahmen.

Als Folge der Wärmeeinwirkung veränderte sich die Verzinkungsstruktur bis zu rd. 4 mm Abstand vom Schweißübergang.

#### - Auslagerungsorte und Prüfstände

Im Verlauf der zunächst für acht Jahre vorgesehenen Bewitterungsversuche auf den Versuchsständen des VDEh in

|                            |  |       |              |
|----------------------------|--|-------|--------------|
| <b>Olpe</b>                | (Landklima,                                  | heute | entsprechend |
|                            | Korrosivitätskategorie C2), (Abb 2)          |       |              |
| <b>Cuxhaven-Sahlenburg</b> | (Küstenklima,                                | heute |              |
|                            | entsprechend Korrosivitätskategorie C4 ) und |       |              |
| <b>Mülheim/Ruhr</b>        | (Stadt-/Industrieklima,                      | heute |              |
|                            | entsprechend Korrosivitätskategorie C4)      |       |              |

zeigten sich mehr als vierjähriger Versuchsdauer gut übereinstimmende Auslagerungsergebnisse für die einzelnen Schutzsysteme. Danach erschien es geraten, die Erfahrungen bereits bekanntzugeben, eine weitere Publikation erfolgte 1983.

Die Proben, bei denen das Schutzsystem innerhalb der 4 bzw. 8 Jahre versagt hatte wurden ausgesondert, die noch verbliebenen Proben wurden von den drei Prüfständen an einer zentralen Stelle zusammengefaßt und dort für weitere 16 Jahre unter einheitlichen Bedingungen ausgelagert. Die Auslagerung erfolgte auf dem Korrosionsprüfstandes des Mannesmann-Forschungsinstituts in

|                           |   |       |
|---------------------------|---|-------|
| <b>Duisburg-Huckingen</b> | (Industrieklima,                        | heute |
|                           | entsprechend Korrosivitätskategorie C4) |       |

danach wurden die Proben über 16 Jahre in jährlichen bzw. zweijährigen Abständen beobachtet und im Jahre 2000 die abschließenden Ergebnisse bezüglich des Zustandes der noch verbliebenen Proben zusammengefaßt.

Im Hinblick auf die Korrosivität der Atmosphäre im Verlaufe der 25 Jahre Auslagerungszeit ist anzumerken, daß die SO<sub>2</sub>-Belastung der Atmosphäre in dieser Zeit deutlich rückläufig war. Ab Mitte der 80er Jahre verringerten sich die Korrosionsraten der Zinküberzüge ebenfalls erheblich. Da jedoch alle Systeme in den letzten 16 Jahren den selben Bedingungen ausgesetzt waren, spielt dieser Effekt für das Ziel der Untersuchung keine Rolle.

#### 4. Versuchsergebnisse und ihre Erörterung

##### 4.1 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse ab 1979

Die Proben wurden im Herbst 1974 ausgelegt. Die Proben wurden, unter 45° nach Süden geneigt, mittels Porzellanisolatoren elektrisch isoliert auf den Untergestellten befestigt (Bild 2). Die Ergebnisse der Auslagerung in den ersten, mehr als 4 Jahren sind in Tabelle 1 enthalten. Hierbei werden zwar nur die Ergebnisse des Prüfstandes mit der höchsten korrosiven Belastung dargestellt (Mülheim/Ruhr), die Proben auf den übrigen Standorten mit geringerer korrosiver

Belastung zeigten jedoch nur ein geringfügig zeitversetztes, im wesentlichen jedoch vergleichbares Verhalten.

Im Mülheim/Ruhr hatten zu diesem Zeitpunkt bereits die Ausbesserungssysteme

2,5,7,9,10,11,15,17,21,22,23,24,25,26 versagt. Es wurde damit klar, daß alle getesteten Ausbesserungslote (Nr. 21 – 26) relativ ungeeignet sind. Untergrundvorbereitung und Verarbeitungsaufwand stehen in keinem Verhältnis zum Ergebnis. Von der Anwendung dieser Ausbesserungslote ist daher abzuraten.

Es muß jedoch angemerkt werden, daß seit der damaligen Zeit neue Lote, mit verbesserten Eigenschaften am Markt verfügbar sind, die jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchungen waren. Darüber hinaus ist es auch möglich, mit reinem Zink-(draht) im Lötverfahren unter Zusatz von Flußmitteln Ausbesserungen durchzuführen. Zu einem späteren Zeitpunkt (ab 1987, Abb. 3) wurden derartige Proben in den Langzeitversuch aufgenommen. Die Verarbeitung dieses reinen Zinklotes ist zwar ebenfalls relativ aufwendig, daß Ergebnis ist jedoch hervorragend, da ein Zinküberzug entsteht, der durchweg deutlich dicker ist als der intakte Zinküberzug des Grundwerkstoffes, der sich jedoch in seiner Zusammensetzung nicht wesentlich von diesem unterscheidet.

Bis zur zweiten, zusammenfassenden Auswertung nach 8 Jahren hatten auch die übrigen Beschichtungen (System Nr. 3,4,6,8,12,13,14,16) versagt.

Farbbeschichtungen, die auf einen lediglich handentrosteten Untergrund aufgetragen wurden, fielen ebenfalls nach sehr kurzer Zeit aus. Hierdurch wird unterstrichen, daß die Sorgfalt der Untergrundvorbereitung einen entscheidenden Einfluß auf die Qualität der Ausbesserung hat.

Farbbeschichtungen gleicher Art, die auf einen mit Korund gestrahlten (Sa 2,5) Untergrund aufgetragen wurden zeigten ein deutlich besseres Ergebnis. Allerdings versagten auch diese Systeme spätestens innerhalb des zweiten Untersuchungszeitraumes, über den nach 8 Jahren berichtet wurde.

Lediglich die thermisch gespritzten Ausbesserungen zeigten auch nach 25 Jahren noch eine gute Schutzwirkung (Abb. 4, 5). Hierbei war jedoch nun erkennbar, daß die Proben, auf welche noch eine zusätzliche Beschichtung aufgetragen worden war, sich nach dieser Zeit in einem besseren Zustand befanden als jene, die nur eine thermisch gespritzte Zinkschicht als Ausbesserung besaßen.

Nach etwa 8 Jahren, zusammen mit der Verlagerung der Proben auf den Prüfstand des Mannesmann-Forschungsinstitutes in Duisburg-Huckingen, begannen die Zinküberzüge sich rotbraun zu verfärben. Dieser Effekt verstärkte sich im Laufe der Jahre immer weiter. Diese rotbraune Verfärbung von Zinküberzügen ist bekannt und tritt primär als Folge von Korrosionsvorgängen der eisenhaltigen Eisen-Zink-

Legierungsschichten der Zinküberzüge auf. Bereits zu Anfang der Versuche war in den Aufzeichnungen festgehalten worden, daß die Zinküberzüge im Neuzustand überwiegend ein mattes Aussehen zeigten und nur sehr dünne Reinzinkschichten die Eisen-Zink-Legierungsphasen überdeckten. Dadurch war eine frühzeitige Braunfärbung der Zinküberzüge vorhersehbar. Von der optischen Beeinträchtigung einmal abgesehen, stellt diese Braunfärbung von Zinküberzügen jedoch keine signifikante Beeinträchtigung der korrosionsverhütenden Eigenschaften von Zinküberzügen dar.

Welche zusammenfassenden Schlußfolgerungen lassen sich daraus ziehen?

Die angewendeten Korrosionsschutzmaßnahmen führten zu folgenden Bewertungen:

Handentrostung als Oberflächenvorbehandlung für nachfolgende Korrosionsschutzbeschichtungen ist einer Strahlentrostung mit Korund deutlich unterlegen;

Einfachbeschichtungen erbringen einen unzureichenden Korrosionsschutz; Zweifach-Beschichtungen verhalten sich zwar erwartungsgemäß besser, versagen jedoch auch spätestens innerhalb von 8 Jahren;

die Korrosionsschutzwirkung der untersuchten Lötüberzüge ist unbefriedigend und der Feuerverzinkung nicht annähernd vergleichbar. Lediglich reines Zinklot bringt gute Ergebnisse, wurde jedoch „nur“ 13 Jahre getestet.

Zinkspritzüberzüge kommen in ihrer Schutzwirkung der Feuerverzinkung am nächsten, innerhalb des untersuchten Zeitraumes sind jedoch nur geringe Vorteile einer zusätzlichen Beschichtung zu erkennen;

Farbbeschichtungen unterschiedlichster Zusammensetzung und ebenso Ausbesserungslote hatten bereits nach 4 bzw. spätestens nach 8 Jahren versagt. Lediglich die thermisch gespritzten Zinküberzüge wiesen noch nach 25 Jahren einen guten bis akzeptablen Zustand auf, wobei jedoch nunmehr auch erkennbar wurden, daß sich die Schutzdauer dieser Systeme, insbesondere ohne zusätzliche Beschichtung, dem Ende neigten. Dieses war ein hinreichender Grund, den Langzeitversuch nunmehr zu beenden.

## Literatur

- [1] Friehe, W., Schwenk, W.; Korrosionsbeständigkeit von nachbehandelten Schweißverbindungen feuerverzinkter Stahlkonstruktionen bei atmosphärischer Beanspruchung; Stahl und Eisen, 1979, Heft 24, S. 1391/1400
- [2] Böttcher, H.-J.; Nachbessern des Korrosionsschutzes an nach dem feuerverzinken geschweißtem Stahl, GAV-Rundschreiben 83/1, 84/9, 86/1, 87/3, GAV, Düsseldorf

## Bildlegende

Abb. 1: Proben aus Rechteck-Hohlprofilen mit stumpf geschweißtem Stoß

Abb. 2: Prüfstand in Olpe (1982)

Tabelle 1: Schutzdauer von Ausbesserungen im Langzeittest

Abb. 3: Nachträglich ausgelagerte Proben mit Zinklot in Duisburg-Huckingen

Abb. 4: Proben mit Schweißnaht-Ausbesserung durch thermisches Spritzen mit Zink nach 25 Jahren

Abb. 5: Mikroschliff durch eine thermisch gespritzte Zinkschicht an einer Schweißnaht

## Abbildungen:

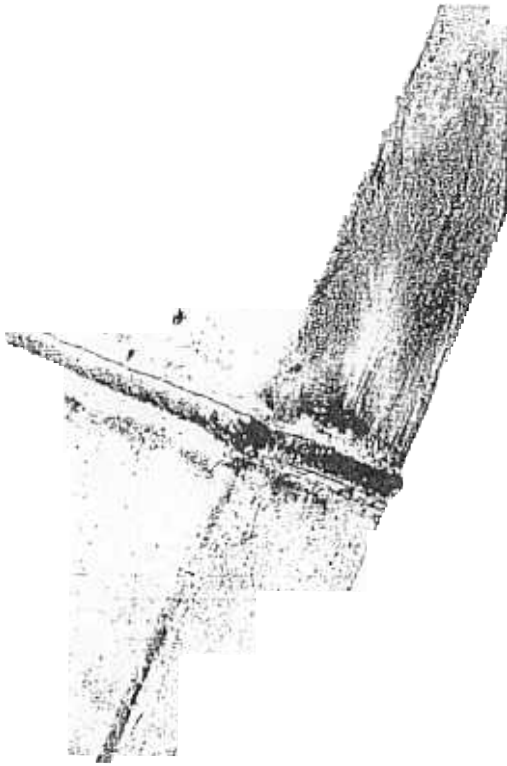


Abb. 1: Proben aus Rechteck-Hohlprofilen mit stumpf geschweißtem Stoß

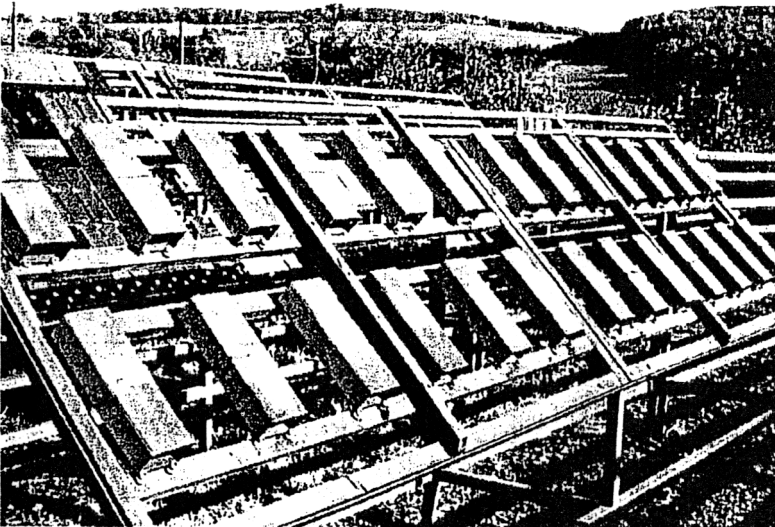


Abb. 2: Prüfstand in Olpe (1982)

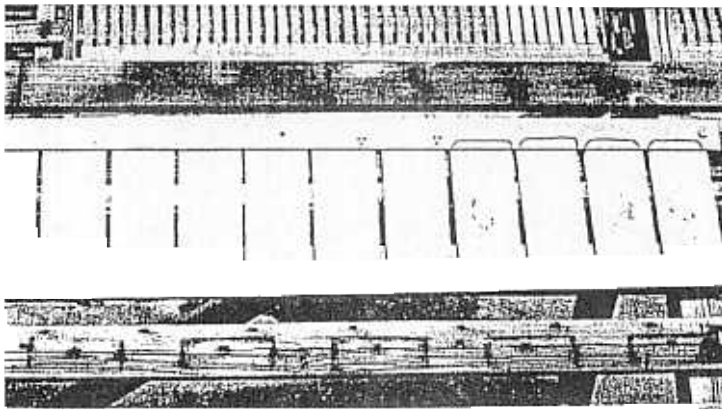


Abb. 3: Nachträglich ausgelagerte Proben mit Zinklot in Duisburg-Huckingen

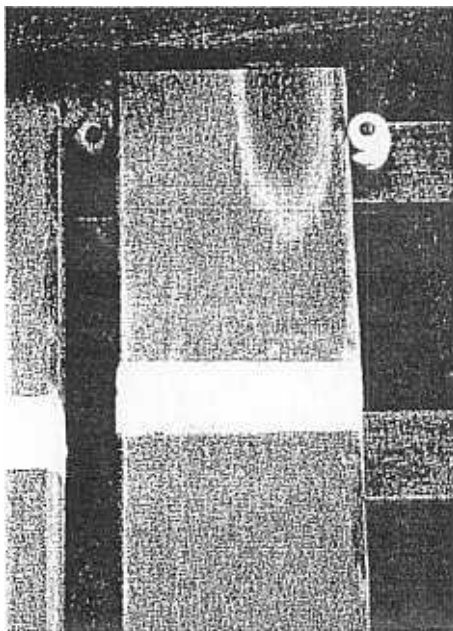


Abb. 4: Proben mit Schweißnaht-Ausbesserung durch thermisches Spritzen mit Zink nach 25 Jahren



Abb. 5: Mikroschliff durch eine thermisch gespritzte Zinkschicht an einer Schweißnaht

Tabelle 1

Ausbesserungssysteme im Langzeitversuch

