

Schriftenreihe Stahlbau - RWTH Aachen

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann  
Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Sedlacek

Heft 67

**Thomas Pinger**

**Zur Vermeidung der Rissbildung an  
Stahlkonstruktionen beim Feuerverzinken unter  
besonderer Berücksichtigung der flüssigmetall-  
induzierten Spannungsrisskorrosion**

D 82 (Diss. RWTH Aachen, 2009)

Shaker Verlag  
Aachen 2009

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2009)

Copyright Shaker Verlag 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8532-6

ISSN 0722-1037

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## VORWORT DER HERAUSGEBER

Mit den über viele Jahrzehnte gewachsenen Regeln der DIN EN ISO 1461, DIN EN ISO 14713, etc. für das Feuerverzinken glaubte man, die besonderen Beanspruchungen, die beim Stückverzinken von großen Stahlbauteilen entstehen, so im Griff zu haben, dass im Allgemeinen keine Risse, insbesondere keine Risse infolge Flüssigmetallversprödung (Liquid Metal Embrittlement, LME, bzw. Flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion, Liquid Metal Assisted Cracking, LMAC), die die Tragfähigkeit der verzinkten Bauteile beeinträchtigen können, entstehen.

Durch die vor einiger Zeit in der Folge von Veränderungen der Zinklegierungszusammensetzungen sprunghaft angestiegene Zahl der Fälle von LME, die zum Teil bedrohliche Standsicherheitsprobleme bereiteten, ist es jedoch nunmehr dringend geboten, die Mechanismen der LME-Bildung beim Feuerverzinken von Stahlbauteilen grundlegend und unter Einbezug möglichst aller Ursachenparameter umfassend zu klären, um so Regeln zur Vermeidung der Rissbildung ableiten zu können.

Hier hat sich Herr Dipl.-Ing. Thomas Pinger mit seiner Dissertation das Ziel gesetzt, für das aus Literatur und Praxis zwar bekannte, bisher aber weder systematisch noch sonst in den Branchen wissenschaftlich behandelte Phänomen grundlegend zu erforschen, die vielfältigen und scheinbar unübersichtlichen Einflüsse zu isolieren und quantifizieren, um darauf aufbauend einen systemtechnischen Ansatz zur Vermeidung der Rissbildung zu finden. Dabei wird das in anderen Disziplinen wenig bekannte Konzept der Grenzzustände, das auf „Grenzzustandsgleichungen“ für „Bemessungssituationen“, die eine die Tragfähigkeit abmindernde Rissbildung erzeugen können, hinausläuft, als Konzept eines quantifizierbaren Nachweises aufgegriffen. Damit wird für das komplexe Rissphänomen ein plausibles Konzept geliefert, das sowohl der Erklärung der Risse als auch der Vermeidung von Rissen dient und auch Grundlage für die neuen normativen Regeln des Feuerverzinkens in der DASt-Richtlinie 022 und international in EN 1993 und EN 1090 sind.

Der Förderung der außerordentlich wichtigen Forschungsarbeiten im Rahmen des europäischen RFCS, der AiF, des DStV, der FOSTA, des GAV, des DIBt und weiterer Beiträge aller beteiligten Industrien sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Dank gebührt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach für den Vorsitz bei der Disser-  
tationsprüfung sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck und Herrn Prof. Dr. rer.  
nat. habil. Alexander Freiherr von Richthofen für die Übernahme der Koreferate.

Aachen, September 2009

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Prof. em. Dr.-Ing. Dr.h.c. Gerhard Sedlacek

## KURZFASSUNG

Das Feuerverzinken ist ein seit über 100 Jahren bewährter Korrosionsschutz, der sowohl durch seine hervorragende Dauerhaftigkeit als auch durch sein Erscheinungsbild eine breite Anwendung erfährt. Der jahrzehntelange Einsatz des Verzinkens und die hohe Robustheit der Baustähle gaben bisher keinen Anlass, die während des Verzinkungsprozesses ablaufenden thermischen und metallchemischen Vorgänge hinsichtlich möglicher Festigkeits- oder Integritätseinbußen im Verzinkungsgut prinzipiell kritisch zu hinterfragen. Vor diesem Hintergrund führte nun eine Häufung von Risserscheinungen an feuerverzinkten Stahlkonstruktionen in den Jahren 2000 – 2006 zu einer starken Verunsicherung am Markt und in der Verzinkungsindustrie. Die Begutachtung derartiger Schäden offenbarte als Ursache den Schädigungsmechanismus der flüssigmetallinduzierten Spannungsrisskorrosion und legte einen direkten Zusammenhang der Schäden mit dem Verzinkungsprozess nahe.

Die im Rahmen dieser Arbeit zunächst durchgeführte Sichtung der Literatur verdeutlicht, dass diese Problematik in ihrer prinzipiellen Art schon seit den 1930er Jahren bekannt ist. Zur Lösung wurden über die Jahrzehnte einige wenige Forschungsvorhaben initiiert und durchgeführt, jedoch ohne zu einer fundierten Erkenntnis über die vielfältigen Einflussfaktoren und deren Zusammenwirken zu kommen. Somit fehlt es nach wie vor an quantifizierten Ansätzen sowohl auf der Beanspruchungs- als auch auf der Widerstandsseite, um das Gefährdungspotential einer Konstruktion beurteilen zu können. Entsprechend fehlt es auch an einer ausreichenden Berücksichtigung dieses Phänomens in der Normung.

In der vorliegenden Arbeit werden auf Grundlage von Schadensfallauswertungen die Einflussfaktoren auf den Schädigungsprozess erfasst und hinsichtlich ihrer Wirkungsweise entweder der Einwirkungsseite oder der Widerstandsseite zugeordnet. Zur Quantifizierung der einwirkenden mechanischen Beanspruchungen aus dem Verzinkungsprozess als auch den vorgeschalteten Fertigungsschritten erfolgt eine Untersuchung mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode sowie der Auswertung von großmaßstäblichen Versuchen. Zur Definition der durch die flüssige Zinkschmelze beeinflussten Widerstandsseite werden Kleinteilversuche in einer neu entwickelten Versuchsanlage durchgeführt.

Aus den derart einzeln erfassten und im Gesamtkontext gewichteten Einflussparametern sowie unter Berücksichtigung der aufgezeigten gegenseitigen Abhängigkeiten lassen sich Grenzzustandsbetrachtungen für die Fälle „Eintauchen der Konstruktion in die

Zinkschmelze“ und „Verweilen in der Zinkschmelze“ ableiten. Das somit aufgestellte Nachweiskonzept stellt eine Möglichkeit dar, die Rissgefährdung einer Stahlkonstruktion zu bestimmen bzw. durch gezielte Einstellung der Parameter eine Rissbildung zu vermeiden.

## SUMMARY

Hot-dip galvanizing is a well established corrosion protection system for more than a century with a huge field of application due to its excellent durability and unique visual appearance. The long period of practice and experience as well as the robustness of mild steels never gave any aspect regarding losing of strength and deformation capacity of steel assemblies during the galvanizing process. Against this background the increase of damage cases in the years 2000 – 2006 leads to great uncertainty in the market and in the galvanizing industry. The investigation of such damages revealed as a cause the mechanism of liquid metal embrittlement (LME) and put a close context to the hot-dip galvanizing process.

The literature review reveals that this phenomenon is known in its principle way since the 1930s. In order to solve the problem some few scientific investigations under different and unsystematically objectives were carried out during the last decades. In summary it has to be stated that a founded understanding of the manifold influencing factors and their coactions could not be gained. Thus, there is still a lack of quantified approaches both the acting loads as well as the resisting load capacity in terms of a general concept to valuate the cracking potential of constructions during the galvanizing process. Accompanying this lack of knowledge is an inadequate account of this phenomenon in the national and international standards.

In the present work the influencing factors are detected on the basis of damage case assessments and with regard to their effect allocated to the side of “actions” on the one side and “resistance” on the other side. The quantification of the acting mechanical loads arising from the galvanizing process as well as from the fabrication processes is carried out using the Finite-Element-Method and the evaluation of large scale trials. The effect of the liquid zinc on the load-deformation-behaviour as the characteristic property on the resistance side is quantified by small-scale tests in a newly developed test procedure.

Under consideration of the arrived quantified data of the ruling influence factors the mutual dependencies and the causes of damage cases become understandable. On this basis a general limit state concept could be derived with the limit state situations “Immersion of the construction in the zinc smelter” and “Holding of the construction in the zinc smelter”. The analytical formulation of these limit states gives the possibility to determine the cracking potential of steel structures during hot dip galvanizing and to define selective measures and adjustment of the parameters to avoid cracks.



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung, Anlass und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1	Rissbildungen an feuerverzinkten Konstruktionen	2
1.2	Beispiele für Schadensfälle und Befund	3
1.3	Zielsetzung	6
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>9</b>
2.1	Beschreibung des Feuerverzinkungsverfahrens	9
2.2	Beschreibung des Zinkschichtaufbaus	11
2.3	Eigenschaften des Grundmaterials vor dem Hintergrund des Feuerverzinkens	17
2.3.1	Allgemeines zu Baustählen	17
2.3.2	Verhalten der Stähle unter äußeren Einflüssen	21
2.3.3	Normative Berücksichtigung des Feuerverzinkens	23
2.4	Kenntnisse zur Rissbildung beim Feuerverzinken von Stahlbaukonstruktionen	24
2.4.1	Allgemeines zur Spannungsrissskorrosion	24
2.4.2	Bisherige Untersuchungen zur Schädigung von Stahl durch eine flüssige Zinkschmelze	39
2.5	Normensituation und technische Regeln für das Feuerverzinken von Stahlbauteilen	60
2.5.1	Europäische Normung zur Regelung des Stückverzinkens	60
2.5.2	Weitere internationale Normen und Richtlinien	67
2.6	Erkenntnisse aus Schadensuntersuchungen	71
2.6.1	Erkenntnisse aus Schadensuntersuchungen hinsichtlich des Einflusses aus der mechanischen Beanspruchung	71
2.6.2	Erkenntnisse aus Schadensuntersuchungen hinsichtlich des Einflusses aus dem Werkstoff	73
2.6.3	Erkenntnisse aus Schadensuntersuchungen hinsichtlich des Einflusses aus dem korrosiven Medium	76
2.7	Zusammenfassung & Fazit	79
<b>3</b>	<b>Vorgehen</b>	<b>83</b>
<b>4</b>	<b>Untersuchung der mechanischen Einwirkungen</b>	<b>87</b>

4.1	Konzept zur Untersuchung der Beanspruchungszustände	87
4.1.1	Träger mit Teilkopfplatte	88
4.1.2	Träger mit Stegbohrung	89
4.1.3	Fachwerk	90
4.1.4	Hohlprofile / geschweißte Hohlkästen	91
4.2	Grundlagen zur Simulation der Beanspruchungszustände	92
4.2.1	Grundlagen der Wärmetübertragung	92
4.2.2	Stahleigenschaften bei erhöhten Temperaturen	94
4.2.3	Grundlagen der numerischen Prozesssimulation	104
4.3	Transiente Beanspruchungen während des Feuerverzinkens von Stahlbaukonstruktionen	130
4.3.1	Beispiel: Träger mit Teilkopfplatte	130
4.3.2	Beispiel: Träger mit Stegbohrung	146
4.3.3	Beispiel: Fachwerkkonstruktion	149
4.3.4	Beispiel: Hohlprofilkonstruktion	150
4.4	Einfluss der geometrischen Detailausbildung auf die Höhe der transienten Beanspruchungen	150
4.4.1	Einfluss konstruktiver Kerben	151
4.4.2	Einfluss des Blechdickenverhältnisses	153
4.4.3	Einfluss der Blechdicke	154
4.5	Einfluss der Zinkschmelzenzusammensetzung und der Vorbehandlung auf den transienten Beanspruchungszustand	155
4.5.1	Hintergrund	155
4.5.2	Auswertung der Effekte	157
4.6	Einfluss verfahrenstechnischer Parameter auf den transienten Beanspruchungszustand	162
4.6.1	Einfluss der Eintauchgeschwindigkeit	162
4.6.2	Einfluss des Eintauchwinkels	164
4.6.3	Einfluss der Vorwärmtemperatur	164
4.7	Schweißbeigenspannungen und deren Einfluss auf die Rissbildung	165
4.7.1	Beispiel: Träger mit Teilkopfplatte	165
4.7.2	Beispiel: Träger mit Stegbohrung	171
4.7.3	Beispiel: Geschweißter Hohlkasten	174
4.8	Walzeigenspannungen und deren Einfluss auf die Rissbildung	177
4.8.1	Hintergrund	177
4.8.2	Beispiel: Träger mit Teilkopfplatte	178

---

4.9	Eigenspannungen infolge Kaltverformung und deren Einfluss auf die Rissbildung	185
4.9.1	Hintergrund	185
4.9.2	Beispiel: Träger mit Teilkopfplatte	186
4.9.3	Dehnungszustand im Trägeruntergurt	188
4.10	Schlussfolgerungen und abschließende Bewertung aus den Untersuchungen der Beanspruchungsanteile	190
4.10.1	Verzinkungsprozess	190
4.10.2	Schweißeigenspannungen	191
4.10.3	Walzeigenspannungen	192
4.10.4	Kaltverformung	192
<b>5</b>	<b>Untersuchung der Beanspruchbarkeit von Baustählen in flüssiger Zinkschmelze</b>	<b>193</b>
5.1	Allgemeines	193
5.2	Konzept zur Untersuchung der Beanspruchbarkeit	193
5.3	Systematische Untersuchung anhand von Kleinteil-versuchen	195
5.3.1	Die L-N(T)-Probenform	196
5.3.2	Versuchsstand	197
5.3.3	Versuchsdurchführung	198
5.3.4	Versuchsergebnisse	201
5.3.5	Numerische Untersuchungen	205
5.3.6	Auswertung einzelner Effekte auf die Beanspruchbarkeit	208
5.4	Mikroskopische Gefügebetrachtungen	214
5.4.1	Einfluss der Zinklegierungszusammensetzung auf die Schichtbildung	214
5.4.2	Einfluss der Zinklegierungszusammensetzung auf das Grundmaterial	215
5.5	Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen zur Beanspruchbarkeit	218
<b>6</b>	<b>Bemessungskonzept und Empfehlungen zur Vermeidung von Rissen in Stahlkonstruktionen beim Feuerverzinken</b>	<b>221</b>
6.1	Ableitung eines Sicherheitsnachweises zur Vermeidung von Rissen in Stahlkonstruktionen beim Feuerverzinken	221
6.1.1	Konzept zur Abgrenzung der Beanspruchungen während der Eintauchphase: Grenzzustand „Eintauchen“	222
6.1.2	Konzept zur Abgrenzung der maximalen Verzinkungsdauer: Grenzzustand „Verweilen“	233
6.2	Allgemeine Empfehlungen zur Reduzierung des Risspotentials beim Feuerverzinken	235

6.2.1	Empfehlungen zum Verzinkungsprozess	235
6.2.2	Empfehlungen zum Grundwerkstoff	236
6.2.3	Empfehlungen zu rissanfälligen Konstruktionsdetails	237
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>239</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>243</b>
<b>Anhang A Schadensfälle</b>		<b>257</b>
A.1	Konstruktionen aus dem Parkhausbau	257
A.2	Weitere Trägerkonstruktionen	258
A.3	Stützenkonstruktionen	259
A.4	Fachwerkkonstruktionen	259
A.5	Kaltverformte Bauteile	260
A.6	Hohlprofilkonstruktionen	261
A.7	Zusammenfassung der Schadensuntersuchungen	261
<b>Anhang B Weitere Versuche zur Bestimmung der transienten Beanspruchungen</b>		<b>263</b>
B.1	Verzinkungsversuche V1 und V2	263
B.2	Eingesetzte Messtechnik	263
B.3	Versuch V1: Probengeometrie, Messtechnik und Verfahrensparameter	265
B.4	Versuchsergebnisse V1	266
B.5	Versuch V2: Probengeometrie und Messtechnik	266
B.6	Versuchsergebnisse V2	267
B.7	Interpretation und Bewertung der Versuchsergebnisse	268
<b>Anhang C Bruchmechanische Betrachtung der transienten Beanspruchungen</b>		<b>271</b>
C.1	Implementierung einer Kerbe	271
C.2	Spannungsintensitätsfaktoren	272
C.3	Rissinitiierung und Rissfortschritt	278
<b>Anhang D Effekt einer Wärmebehandlung zur Reduzierung der Rissanfälligkeit</b>		<b>281</b>
D.1	Wärmebehandlung zum Abbau von Eigenspannungen	281

	Inhalt	
D.2	Wärmebehandlung zur gezielten Einprägung von Druckspannungen	281
<b>Anhang E Prüfung bestehender feuerverzinkter Stahlkonstruktionen</b>		<b>285</b>
E.1	Einführung	285
E.2	Beurteilung des Risikopotentials verzinkter Stahlkonstruktionen	285
E.3	Verfahren zur Prüfung verzinkter Bauteile	288
E.3.1	Allgemeines zur zerstörungsfreien Prüfung	288
E.3.2	Verfahren und Anforderungen zur Prüfung verzinkter Bauteile	289
E.3.2.1	Sichtkontrolle	289
E.3.2.2	Magnetpulverprüfung	290
E.3.3	Sonstige, weniger geeignete Verfahren	293
E.3.3.1	Eindringprüfung	293
E.3.3.2	Ultraschallprüfung	293
E.3.3.3	Durchstrahlprüfung	294