

Forschungsvorhaben P 835 / IGF-Nr. 351 ZBG

Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau

Hot-dip galvanizing for steel and composite bridges

Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau

Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann

Dipl.-Ing. Dennis Rademacher

Technische Universität Darmstadt, Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Dr.-Ing. Rainer Landgrebe

Dipl.-Ing. Jörg Adelman

Dipl.-Ing. Fabian Simonsen

Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH

Dr.-Ing. Susanne Friedrich

Dipl.-Ing. (FH) Peter Lebelt

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

Das IGF-Vorhaben 351 ZBG der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde an der Technischen Universität Dortmund vom Lehrstuhl Stahlbau, an der Technischen Universität Darmstadt von der Staatlichen Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde und vom Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH durchgeführt.

Beteiligte Unternehmen:

Anwikar Consultants GmbH Ingenieur-Gesellschaft für Bauwesen, Würzburg, Arcelor-Mittal Belval & Differdange S.A., Esch-Sur-Alzette, ArcelorMittal Commercial Long Deutschland GmbH, Köln, ArcelorMittal Long Carbon Europe, Esch-Sur-Alzette, BASt Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, bauforumstahl e. V., Berlin und Düsseldorf, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn, DB Netz AG, Frankfurt, DEGES - Deutsche Einheit Fernstraßen- planungs- und -bau GmbH, Berlin, Donges SteelTec GmbH, Darmstadt, Eiffel Deutschland Stahltechnologie GmbH, Hannover, Feuerverzinkung Hannover GmbH Co. KG, Langenhagen, Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V., Düsseldorf, GP Innovation GmbH, Lübbenau, Gregull + Spang Ingenieurgesellschaft für Stahlbau mbH, Stahnsdorf, IEMANTS N.V., Arendonk, IFINKOR - Institut für Instandhaltung und Korrosionsschutztechnik gGmbH, Iserlohn, Ilsenburger Grobblech GmbH, Ilsenburg, Ingenieurbüro Dr. Schleicher, Eichwalde, Ingenieurbüro Grassl GmbH Beratende Ingenieure Bauwesen, Hamburg, Ingenieurgruppe BAUEN GbR, Karlsruhe, Institut Feuerverzinken GmbH, Düsseldorf, IWB Werkstofftechnologie GmbH, Chemnitz, Klähne Beratende Ingenieure im Bauwesen GmbH, Berlin, Köster & Co. GmbH, Ennepetal, Landesbetrieb Straßenbau NRW, Gelsenkirchen, Maschinen- und Stahlbau Dresden GmbH, Dresden, MCE Stahl- und Maschinenbau GmbH & Co KG, Linz, Meyer Steel Tech GmbH, Herborn, MTM Ingenieure GmbH Beratende Ingenieure Bauwesen, Düsseldorf, NE Sander Eisenbau GmbH, Sande, PERR Stahlbau Betriebs GmbH, Dietfurt, sb-b Stahlbauberatung Bärsch, Worms, Schachtbau Nordhausen GmbH, Nordhausen, Schäfer GmbH Stahlbau-Industriemontagen, Dillingen, Seppeler Holding & Verwaltungs GmbH & Co. KG, Rietberg, Sperian Fall Protection Deutschland GmbH & Co. KG, Hof/Saale, SSF Ingenieure AG Beratende Ingenieure im Bauwesen, Berlin, Stahlbau Dessau GmbH & Co. KG, Dessau, The Coatinc Company Holding GmbH, Kreuztal, Vallourec Deutschland GmbH, Düsseldorf, Verheyen-Ingenieure GmbH & Co. KG, Bad Kreuznach, voestalpine Grobblech GmbH, Linz, Voigt & Schweitzer GmbH & Co. KG, Gelsenkirchen, Wiegel Verwaltung GmbH & Co. KG, Nürnberg, ZinkPower Willi Kopf e.K., Schlierbach

© 2014 Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf
Printed in Germany

Bestell-Nr. P 835
ISBN 978-3-942541-48-0

Ansprechpartner bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.:
Dr. Gregor Nüsse M.Sc.
Tel.: +49 (0)211 / 6707-839; Fax: +49 (0)211 / 6707-840

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung des Verlages sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

Kurzdarstellung

Stahl- und Verbundbrücken werden in Deutschland und in Europa üblicherweise durch eine organische Beschichtung vor Korrosion geschützt. Diese Beschichtungen haben eine theoretische Schutzdauer von bis zu 25 Jahren. Im Vergleich dazu bietet das Stückverzinken von Stahlbauteilen einen sehr langlebigen und robusten Korrosionsschutz, der bereits im Stahlhochbau einen großen Marktanteil einnimmt. Schutzdauern von 80 Jahren und mehr sind dabei keine Seltenheit. Dadurch lassen sich Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten deutlich verringern.

Für Brücken im Verkehrswegebau lassen sich diese ökologischen und ökonomischen Vorteile bislang noch nicht nutzen. Derartige Brücken sind zyklischen Belastungen ausgesetzt, die einen Nachweis gegen Werkstoffermüdung gemäß DIN EN 1993-2 und DIN EN 1994-2 erfordern. Da der Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen bei zyklisch wirkenden Belastungen bisher nicht ausreichend untersucht wurde, werden feuerverzinkte Bauteile bislang nicht von der Bemessungsnorm erfasst.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist daher die Erarbeitung und Bereitstellung der grundlegenden wissenschaftlich und technisch erforderlichen Erkenntnisse zur grundsätzlichen Anwendung der Feuerverzinkung im Stahl- und Verbundbrückenbau.

Dafür wurden Versuche zur Ermüdungsfestigkeit an für den Brückenbau typischen Kerbdetails im feuerverzinkten Zustand durchgeführt, die teilweise durch Vergleichsproben im unverzinkten Zustand ergänzt wurden. Des Weiteren war es erforderlich, den Korrosionsschnachweis für die Feuerverzinkung und deren Reparaturtechnologie durch thermisch gespritzten Zinküberzug an Transport- und Montageschäden für eine angestrebte Nutzungsdauer von 100 Jahren zu erbringen. Basis hierfür waren sowohl eine Literatursauswertung als auch diverse Versuche zu Schutzdauer, Vorbehandlungsmethoden und Ausführungsvarianten.

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Feuerverzinkung einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat, der auch teilweise zu einer Abminderung der Detail-Kategorien für den Nachweis gegen Werkstoffermüdung führt. Die Ursachen dafür konnten in der Ausbildung des Zinküberzugs identifiziert werden. Parallel konnte der Nachweis für eine theoretische Korrosionsschutzdauer von 100 Jahren, also in gleicher Länge wie die Nutzungsdauer der Brücke, sowohl für die stückverzinkten Bauteile als auch für spritzverzinkte Ausbesserungsstellen an Montageschweißstößen erbracht werden. Auf dieser Basis wurden für den Anwender Konstruktionsempfehlungen in Form einer Broschüre erstellt.

Die ganzheitliche Betrachtung der Bau- und Unterhaltungskosten zeigt die entscheidenden Vorteile der Feuerverzinkung im Lebenszyklus von Brückentragwerken.

Abstract

Steel and composite bridges in Germany and Europe are usually protected against corrosion by organic coatings. These coatings have a theoretical term of protection of up to 25 years. In comparison hot-dip galvanizing of steel components is a very durable and robust corrosion protection. Therefore hot-dip galvanizing has a large market share in steel building constructions. Protection periods of several decades up to 80 years or more are not uncommon. Thereby maintenance and repair works can be significantly reduced.

These ecological and economic advantages currently cannot be taken advantage of in steel and composite bridge construction. These bridges are subjected to cyclic loads and require a proof against fatigue according to DIN EN 1993-2 and DIN EN 1994-2. Since the influence of hot-dip galvanizing on the fatigue strength of the steel construction components under cyclical action of traffic load has not been sufficiently analyzed so far, hot-dip galvanized steel is currently not covered by the design standards. Therefore, the required proof cannot be provided.

The aim of the research presented here is to develop and present the elementary scientific and technical knowledge necessary on the use of hot-dip galvanization in designing steel and composite bridges.

The basis therefor were tests on the fatigue strength of typical structural details for bridge constructions in galvanized condition, partially added by comparative tests with specimens in the non-galvanized initial state. Furthermore, it was necessary to provide a proof against corrosion for the hot dip galvanizing and additionally its repair technology by thermally sprayed zinc coating, applied on transport and mounting damages, for the intended life of 100 years. Basis for this were both a literature review as well as various tests on protection periods, pretreatment methods and execution variants.

The result was, that hot-dip galvanizing has a significant influence on the fatigue strength, which partially also leads to a reduction of the detail categories for the proof against fatigue. The causes could be identified in the formation of the zinc coating. Comparative calculations for small and medium span-width bridges show only slight changes in the construction weights. At the same time the evidence for a theoretical corrosion protection period of 100 years, thus the same length as the service life of a bridge, could be provided for both the hot-dip galvanized components and by metal-spraying repaired locations at welded joints. For the user prepared design recommendations were provided in form of a brochure.

The holistic view of the construction and maintenance costs shows the key advantages of hot-dip galvanizing in the life cycle of bridge structures.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Forschungsanlass.....	1
1.2	Ziele des Forschungsvorhabens	3
1.3	Aufbau dieses Berichts	4
2	Stand der Technik	6
2.1	Brückenbau in Deutschland	6
2.2	Brücken in Verbundbauweise	10
2.3	Ermüdung	11
2.3.1	Stahlkonstruktionen unter zyklischer Beanspruchung	11
2.3.2	Normative Regelungen	13
2.3.3	Auswertung nach Background-Dokument Eurocode 3-1-9 [114].....	14
2.3.4	Auswertung nach Treppenstufenverfahren.....	17
2.4	Zinküberzüge als Korrosionsschutzsystem	21
2.4.1	Allgemeines	21
2.4.2	Prozess des Feuerverzinkens	23
2.4.3	Prozess der Spritzmetallisierung	27
2.4.4	Korrosionsschutz durch Zinküberzüge an der Atmosphäre	31
2.4.5	Schutzdauer von Zinküberzügen an der Atmosphäre.....	35
2.4.6	Beeinflussung der Korrosionsschutzwirkung durch konstruktive Gestaltung	40
2.4.7	Nachhaltigkeit der Feuerverzinkung	41
2.5	Feuerverzinkte Stahlbrücken – National und International.....	42
3	Bauteilversuche zur Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Bauteile	46
3.1	Theoretische Untersuchungen zur Ermittlung der maßgebenden Beanspruchungen.....	46
3.1.1	Abgrenzung der verwendbaren Brückentypen.....	46
3.1.2	Maßgebende Bauteildetails	51
3.1.3	Studie zur Auswahl der Bauteildetails	55
3.1.4	Schwingbreitenverhältnis R	58
3.2	Versuchsumfang	59
3.3	Bauteil-Versuchsreihe 1 – Längsnaht	61
3.3.1	Versuchsaufbau Kleinteil-T-Proben	61
3.3.2	Versuchsdurchführung.....	63

3.3.3	Statischer Vorversuch	64
3.3.4	Ergebnisse	65
3.3.5	Versuchsaufbau Bauteil-Proben	67
3.3.6	Versuchsdurchführung	68
3.3.7	Ergebnisse	69
3.3.8	Weiterer Kerbfall	71
3.4	Bauteil-Versuchsreihe 2 – Längsnaht über Quernaht	73
3.4.1	Vorbemerkungen	73
3.4.2	Versuchsdurchführung – statischer Vorversuch	73
3.4.3	Ergebnisse	74
3.4.4	Weitere Kerbfall – blecheben geschliffener Stumpfstoß	78
3.5	Bauteil-Versuchsreihe 3 – Querstoß eines Walzträgers	79
3.5.1	Versuchsaufbau	79
3.5.2	Versuchskörper	81
3.5.3	Statischer Vorversuch	82
3.5.4	Versuchsdurchführung	84
3.5.5	Zinkschichtdicke am Beispiel TS 005	86
3.5.6	Ergebnisse	87
3.6	Bauteil-Versuchsreihe 4 – Quersteife in Walzträger	91
3.6.1	Versuchsaufbau	91
3.6.2	Versuchskörper	92
3.6.3	Statischer Vorversuch	93
3.6.4	Zinkschichtdicke am Beispiel WQS 010	96
3.6.5	Ergebnisse	97
3.7	Bauteil-Versuchsreihe 5 – Kopfbolzen (Schub)	101
3.7.1	Versuchsaufbau	101
3.7.2	Versuchskörper	103
3.7.3	Versuchsdurchführung	105
3.7.4	Statische Vorversuche	108
3.7.5	Ergebnisse der Versuche mit zyklischer Belastung	110
4	Vergleichende Ermüdungsversuche an Kleinteilproben	115
4.1	Versuchsmethode / Ziele	116
4.2	Versuchsaufbau und -durchführung	117
4.3	Ergebnisse der vergleichenden Ermüdungsversuche	118
4.3.1	Allgemeines	118

4.3.2	Ermüdungsversuche an ungeschweißten Flachproben aus S355J2+N.....	119
4.3.3	Ermüdungsversuche an ungeschweißten Flachproben aus S355JR+AR.....	123
4.3.4	Ermüdungsversuche an ungeschweißten Flachproben aus P460NL2/NH	127
4.3.5	Ermüdungsversuche an ungeschweißten Flachproben aus S700MC.....	128
4.3.6	Ermüdungsversuche an Flachproben aus P460NL2/NH mit Stumpfstoß	130
4.3.7	Ermüdungsversuche an Flachproben aus S460M mit Stumpfstoß ...	135
4.3.8	Ermüdungsversuche an Flachproben aus S460M mit aufgeschweißter Quersteife.....	138
4.4	Zusammenfassung der Ermüdungsversuche an geschweißten und ungeschweißten Kleinteilproben	141
4.4.1	Vorbemerkungen	141
4.4.2	Zusammenfassung der Ermüdungsversuche an ungeschweißten Proben.....	141
4.4.3	Zusammenfassung der Ermüdungsversuche an geschweißten Proben.....	143
4.4.4	Ergebnisse der vergleichenden Ermüdungsversuche an Kleinteilproben.....	144
5	Ursachen des Ermüdungsfestigkeitsabfalls verzinkter Kleinteilproben.....	145
5.1	Vorgehen	146
5.1.1	Allgemeines	146
5.1.2	Auswertung der Versuchsergebnisse aus Kapitel 4 nach dem Treppenstufenverfahren	147
5.2	Grundcharakterisierung.....	150
5.2.1	Zinküberzug.....	150
5.2.2	Oberflächenrauigkeiten.....	153
5.2.3	Eigenstressungen.....	154
5.3	Flüssigmetallinduzierte Risse (LMAC) und deren Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit von Baustahl.....	155
5.3.1	Flüssigmetallinduzierte Risse - <i>liquid metal assisted cracking</i> LMAC.....	155
5.3.2	Herstellung rissbehafteter Proben	157
5.3.3	Ermüdungsversuche an vorbelasteten Proben.....	159
5.3.4	Bruchflächenanalyse	161
5.3.5	Zusammenfassung	163

5.4	Mikrofraktographische Bruchflächenanalyse der Ermüdungsbrüche an Kleinteilproben.....	163
5.5	Versuche an Proben mit abgebeizter Zinkschicht	165
5.6	Metallographische Untersuchung von Ermüdungsrissen	166
5.7	Abschätzung des Einflusses von Mikrorissen in dem Zinküberzug	167
5.8	Zusammenfassung und Bewertung.....	168
6	Ermüdungsfestigkeit von feuerverzinkten Bauteilen zur Bemessung nach EC 3.....	170
6.1	Detail-Kategorien entsprechend EC 3-1-9.....	170
6.2	Auswirkungen auf die Dimensionierung	174
7	Nachweis der Korrosionsschutzwirkung der Zinküberzüge.....	178
7.1	Bestimmung der aktuellen Korrosivität an Straßenbrücken in Deutschland	179
7.2	Qualifizierung des praxisrelevanten Korrosionsschutzsystems	184
7.2.1	Vorbemerkungen	184
7.2.2	Analytische Untersuchung des Grundmaterials und des Feuerzinküberzugs	185
7.2.3	Parameterbestimmung für die Reparaturtechnologie durch Spritzmetallisieren.....	186
7.2.4	Herstellung geschweißter Proben mittels T- und Stumpfstoßen	194
7.2.5	Nachweis der Oberflächenvorbereitung der geschweißten Proben ..	197
7.2.6	Analytische Untersuchung der thermisch gespritzten Zinküberzüge	201
7.3	Belastungstests für Korrosionsschutzuntersuchungen.....	207
7.3.1	Vorbemerkungen	207
7.3.2	Laborbelastung	207
7.3.3	Freibewitterung	209
7.4	Ergebnisse der Laborbelastung.....	210
7.4.1	Auswirkung der Laborbelastungen auf Zinküberzüge	211
7.4.2	Schwachstellen im Korrosionsschutzsystem Zinküberzug.....	217
7.4.3	Zusammenfassung	221
7.5	Ergebnisse der Freibewitterung.....	222
7.5.1	Allgemeines	222
7.5.2	Überzugseigenschaften der Referenzproben nach einjähriger Freibewitterung	222
7.5.3	Visuelle Bewertung des Korrosionsschutzsystems der geschweißten Proben	227

7.5.4	Analytische Untersuchungen des bewitterten Korrosionsschutzsystems	236
7.5.5	Zusammenfassung	242
7.6	Vergleichende Betrachtung von Korrosionsschutzsystemen im Einsatz des Brückenbaus	243
7.7	Kostenvergleich am Beispiel einer Wirtschaftsweg-Brücke.....	246
7.7.1	Allgemeines	246
7.7.2	Kosten für organisches Beschichtungssystem	248
7.7.3	Kosten für einen Zinküberzug.....	250
7.7.4	Kostenvergleich der Erstinvestition des Korrosionsschutzes.....	254
7.7.5	Kostenvergleich für die Nutzung des Korrosionsschutzes von 100 Jahren.....	256
7.8	Diskussion und Fazit	257
8	Feuerverzinkungsgerechte Konstruktion von Brücken	259
8.1	Geltende Regeln	259
8.2	Zusätzliche spezifische Regelungen für den Brückenbau.....	261
8.2.1	Feuerverzinkungsgerechtes Konstruieren	261
8.2.2	Vermeidung/Reduktion von Verzug	262
8.2.3	Transport	263
8.3	Dauerhaftigkeit der Feuerverzinkung und Zinkschichtdicke	263
8.4	Montagestöße	264
8.5	Technologische Vorgaben für die Ausbesserung von Beschädigungen des Feuerzinküberzugs.....	265
8.5.1	Allgemeine Anforderungen	265
8.5.2	Oberflächenvorbereitung	266
8.6	Gestaltung der Oberfläche	268
8.7	Qualitätssicherung und Prüfungen.....	269
8.7.1	Prüfung auf Risse	269
8.7.2	Messung der Schichtdicke von Zinküberzügen	269
8.7.3	Besondere Prüfanforderungen für die Ausbesserungen.....	270
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	272
9.1	Resümee.....	273
9.2	Ausblick.....	274
10	Literaturverzeichnis	276
	ANHANG.....	289

Content

1	Introduction	1
1.1	Initial situation.....	1
1.2	Goals of the research project	3
1.3	Approach	4
2	State of the Art.....	6
2.1	Bridge construction in Germany	6
2.2	Composite bridges	10
2.3	Fatigue	11
2.3.1	Steel constructions under cyclic loads	11
2.3.2	Standardization	13
2.3.3	Evaluation according to background-document Eurocode 3-1-9 [114].....	14
2.3.4	Evaluation according to staircase method	17
2.4	Zinc coatings as corrosion protection system.....	21
2.4.1	General	21
2.4.2	Hot-dip galvanizing process	23
2.4.3	Metal-spraying process	27
2.4.4	Corrosion protection by means of zinc coatings in the atmosphere	31
2.4.5	Durability of zinc coatings in the atmosphere.....	35
2.4.6	Influencing the corrosion protection effect by means of constructive design	40
2.4.7	Sustainability of hot dip galvanizing	41
2.5	Hot-dip galvanized steel bridges – national and international	42
3	Large scale tests for the fatigue strength of hot-dip galvanized components.....	46
3.1	Theoretical studies to identify the relevant loads.....	46
3.1.1	Definition of suitable bridge types	46
3.1.2	Decisive construction details.....	51
3.1.3	Studies on selection of construction details	55
3.1.4	Stress range ratio R	58
3.2	Scope of experimental tests	59
3.3	Longitudinal fillet weld	61
3.3.1	Test set-up small scale T-specimens.....	61
3.3.2	Test procedure.....	63

3.3.3	Static preliminary test	64
3.3.4	Results.....	65
3.3.5	Test set-up large scale specimens	67
3.3.6	Test procedure	68
3.3.7	Results.....	69
3.3.8	Further detail	71
3.4	Longitudinal fillet weld over butt weld.....	73
3.4.1	Preliminary notes.....	73
3.4.2	Test procedure – static preliminary test.....	73
3.4.3	Results.....	74
3.4.4	Further detail – transverse splices in plates.....	78
3.5	Butt weld of rolled girder	79
3.5.1	Test set-up.....	79
3.5.2	Specimens.....	81
3.5.3	Static preliminary test	82
3.5.4	Test procedure	84
3.5.5	Zinc coating thickness on the example TS 005	86
3.5.6	Results.....	87
3.6	Stiffeners in rolled girders	91
3.6.1	Test set-up.....	91
3.6.2	Specimens.....	92
3.6.3	Static preliminary test	93
3.6.4	Zinc coating thickness on the example WQS 010	96
3.6.5	Results.....	97
3.7	Studs (shear)	101
3.7.1	Test set-up.....	101
3.7.2	Specimens.....	103
3.7.3	Test procedure	105
3.7.4	Static preliminary tests.....	108
3.7.5	Results of tests with cyclic loading	110
4	Comparative fatigue tests with small scale specimens.....	115
4.1	Experimental method / objectives	116
4.2	Experimental set-up and implementation	117
4.3	Results of comparative fatigue tests	118
4.3.1	Preface	118

4.3.2	Fatigue tests on flat non-welded samples from S355J2 + N	119
4.3.3	Fatigue tests on flat non-welded samples from S355JR + AR	123
4.3.4	Fatigue tests on flat non-welded samples from P460NL2/NH.....	127
4.3.5	Fatigue tests on flat non-welded samples from S700MC	128
4.3.6	Fatigue tests on flat specimens from P460NL2/NH with seam	130
4.3.7	Fatigue tests on flat specimens from S460M with seam	135
4.3.8	Fatigue tests on flat specimens from S460M with welded stiffener...	138
4.4	Summary of fatigue tests on welded and non-welded small samples	141
4.4.1	Preliminary Notes.....	141
4.4.2	Summary of fatigue tests on non-welded samples.....	141
4.4.3	Summary of fatigue tests on welded specimens	143
4.4.4	Results of comparative fatigue tests on small samples.....	144
5	Causes of the reduction of fatigue strength of galvanized small samples.....	145
5.1	Procedure.....	146
5.1.1	Preface	146
5.1.2	Statistic Evaluation of test results from Chapter 4.....	147
5.2	Basic characterization	150
5.2.1	Zinc coating.....	150
5.2.2	Surface roughness.....	153
5.2.3	Residual stresses.....	154
5.3	Liquid metal assisted cracking and its influence on the fatigue strength of steel.....	155
5.3.1	Liquid metal assisted cracking (LMAC).....	155
5.3.2	Creation of crack containing specimens	157
5.3.3	Fatigue tests on crack containing specimens.....	159
5.3.4	Analysis of surface of fracture.....	161
5.3.5	Summary.....	163
5.4	Fracture surface analysis of fatigue fractures of small specimen	163
5.5	Experiments with of stripped zinc coating	165
5.6	Metallographic examination of fatigue cracks.....	166
5.7	Assessment of the influence of micro-cracks in the zinc coating.....	167
5.8	Summary and evaluation.....	168
6	Fatigue resistance of hot-dip galvanized components for dimensioning according to EC 3	170
6.1	Detail categories according to EC 3-1-9.....	170

6.2	Effects on dimensioning	174
7	Verification of the corrosion protection effect of the zinc coatings	178
7.1	Determination of the current corrosivity on road bridges in Germany	179
7.2	Qualification of the practice-oriented corrosion protection system	184
7.2.1	Preliminary	184
7.2.2	Analysis of the substrate and the hot-dip galvanizing	185
7.2.3	Parameter determination for the repair technology by means of metal spraying	186
7.2.4	Preparation of welded test specimens by means of T joints and butt joints	194
7.2.5	Verification of the surface preparation of the welded test specimens	197
7.2.6	Analysis of the thermal-sprayed zinc coatings	201
7.3	Stress tests for corrosion protection examinations	207
7.3.1	Preliminary	207
7.3.2	Laboratory stress application	207
7.3.3	Natural weathering	209
7.4	Results of the laboratory stress application	210
7.4.1	Effect of the laboratory stress applications on zinc coatings	211
7.4.2	Weak spots in the corrosion protection system zinc coating	217
7.4.3	Summary	221
7.5	Results of the natural weathering	222
7.5.1	Preface	222
7.5.2	Coating properties of the reference test specimens after one year of natural weathering	222
7.5.3	Visual assessment of the corrosion protection system of the welded test specimens	227
7.5.4	Analysis of the exposed corrosion protection systems	236
7.5.5	Summary	242
7.6	Comparative examination of corrosion protection systems used in bridge constructions	243
7.7	Cost comparison exemplified by a service road bridge	246
7.7.1	Preface	246
7.7.2	Costs of organic coating system	248
7.7.3	Costs of zinc coating	250
7.7.4	Cost comparison of the initial investment for corrosion protection	254

7.7.5	Cost comparison for using the corrosion protection over 100 years	.256
7.8	Discussion and conclusion	257
8	Bridge construction suitable for hot-dip galvanizing	259
8.1	Existing regulations	259
8.2	Additional specific regulations for bridge constructions	261
8.2.1	Designing appropriately for hot-dip galvanizing	261
8.2.2	Avoidance/reduction of distortion	262
8.2.3	Transport	263
8.3	Durability of hot-dip galvanizing and thickness of zinc coating	263
8.4	Mounting connections	264
8.5	Technological guidelines for the repair of damages to the zinc coating	265
8.5.1	General requirements	265
8.5.2	Surface preparation	266
8.6	Design of surface	268
8.7	Quality control and testing	269
8.7.1	Testing for cracks	269
8.7.2	Measure the thickness of zinc coating	269
8.7.3	Special testing requirements for repairs	270
9	Summary and Outlook	272
9.1	Résumé	273
9.2	Outlook	274
10	Bibliography	276
Annex		289

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Feuerverzinkte Autobahn-Überführung bei Stainsby Hall, UK	3
Abbildung 1.2:	Schematische Aufteilung der experimentellen Untersuchungen	4
Abbildung 2.1	Längenverteilung von Straßenbrücken (BAB und Bundesstraßen) [106]	7
Abbildung 2.2	Bauarten neuer, ausgeführter Straßenbrücken (Quelle: DEGES aus [106])	7
Abbildung 2.3	Bauarten kommunale Straßenbrücken [23]	8
Abbildung 2.4	Schäden, die maßgeblich für den Abriss der beschriebenen Straßenbrücken sind [23].....	8
Abbildung 2.5	Stützweitenverteilung Bahnbrücken Bestand [106].....	9
Abbildung 2.6	Bauarten von bestehenden Bahnbrücken (aus [106])	9
Abbildung 2.7	Verbundträger aus Walzprofilen mit Ortbetonplatte, Querschnitt aus [106].....	10
Abbildung 2.8	Verbundfertigteile mit Walzprofilen konstanter Höhe mit ergänzter Ortbetonplatte (d=0,25m), Querschnitt aus [106]	11
Abbildung 2.9	Bestimmung des Kerbfalls für Konstruktionsdetails [32]	12
Abbildung 2.10:	Schematische Wöhlerlinie, hier dargestellt mit weiterem Abfall nach dem Abknickpunkt [87].....	18
Abbildung 2.11:	Schematische Darstellung des Horizontverfahrens im Zeitfestigkeitsbereich [87]	20
Abbildung 2.12:	Schematische Darstellung des Treppenstufenverfahrens [87]	20
Abbildung 2.13:	Treppenstufenverfahrens beschrieben in DIN 969 [24]	21
Abbildung 2.14	Schematische Darstellung eines Feuerverzinkungsprozesses [118].....	23
Abbildung 2.15	Zinkschichtdicke in Abhängigkeit vom Siliziumgehalt im Stahl (Tauchdauer: 10 min, Phosphor < 0,02 Masse-%)	25
Abbildung 2.16	Gegenüberstellung der Gefügeausbildung und Schichtdicke von Feuerzinküberzügen	26
Abbildung 2.17	Gefügeausbildung beim Stückgutverzinken [122].....	27
Abbildung 2.18	Schematische Darstellung des Spritzgefüges [119].....	28
Abbildung 2.19	Geometrische, wahre und wirksame Oberfläche [46]	28
Abbildung 2.20	Schematische Darstellung des Lichtbogensspritzens [119].....	29
Abbildung 2.21	Schematische Darstellung des Drahtflammspritzens [119].....	30
Abbildung 2.22	Korrosionsverhalten von Zinküberzügen in Abhängigkeit vom pH-Wert [118]	33
Abbildung 2.23	Einfluss der SO ₂ -Konzentration auf den Zinkabtrag [89]	34
Abbildung 2.24	Schadstoffbelastung der Luft von 1990 bis 2009 in Deutschland [126].....	36
Abbildung 2.25	korrosionsschutzgerechte Gestaltung von Schweißnähten [58].....	41
Abbildung 2.26	korrosionsschutzgerechte Gestaltung von Aussteifungen [58]	41
Abbildung 2.27	Vermeiden von Oberflächenfehlern an Schweißstellen [58]	41

Abbildung 2.28	Grundregeln zum Vermeiden von Ablagerungen und Wasseransammlungen [58]	41
Abbildung 2.29:	Umweltbelastung in verschiedenen Wirkungskategorien im Vergleich [52]	42
Abbildung 2.30	Feuerverzinkte Fußwegbrücken in Göttingen, 1988 (links) und Rietberg, 2007 (rechts)	43
Abbildung 2.31	Brücke Ehzerbrug, Niederlande (links) und Sauk River, Washington, USA (rechts).....	43
Abbildung 2.32	Feuerverzinkte Straßenbrücke über die Lenne (D) – zul. Verkehrsbelastung 12 t	44
Abbildung 2.33	Feuerverzinkte Autobahnbrücke bei Stainsby Hall, UK.....	44
Abbildung 2.34	Feuerverzinkte Brücke in Japan.....	45
Abbildung 3.1:	Prinzip der Doppeltauchung.....	47
Abbildung 3.2:	Trogbrücke – Ausführung A (RiZ S-TRO 10) [21]	48
Abbildung 3.3:	Hohlkastentragwerk – Endquerträger (RiZ S-HOK 10) [21]	49
Abbildung 3.4:	Typischer Querschnitt WIB-Brücke	49
Abbildung 3.5:	Typischer Querschnitt Verbundbrücke	50
Abbildung 3.6:	Vergleich Normalspannungsverlauf kompakte und hohe Träger	54
Abbildung 3.7:	Stumpfstoß mit Dickensprung	57
Abbildung 3.8:	Beispiel Verbundquerschnitt	58
Abbildung 3.9:	Prinzip der Versuchsabfolge	60
Abbildung 3.10:	Prinzip der Kleinteil-T-Probe	61
Abbildung 3.11:	Prinzipskizze Probe mit Spannklötzen und Schrauben	62
Abbildung 3.12:	Abmessungen Kleinteil-T-Probe	62
Abbildung 3.13:	Vergleich Spannungen Träger und Kleinteil-T-Probe.....	63
Abbildung 3.14:	Wegaufnehmer an Kleinteil-T-Probe	64
Abbildung 3.15:	Maschinen-Kraft/-Weg-Diagramm statischer Vorversuch LNKT.....	65
Abbildung 3.16:	Ergebnisse Versuchsreihe LNKT	66
Abbildung 3.17:	Versuchsträger für Detail „Längsnaht“	67
Abbildung 3.18:	3-D Simulation des Versuchsaufbaus zum Detail „Längsnaht“	68
Abbildung 3.19:	Querschnitte der Versuchsträger „Längsnaht“, links: LNG, rechts: LNGL.....	68
Abbildung 3.20:	DMS-Belegung 4-Punkt-Biegung „Längsnaht“	69
Abbildung 3.21:	Ergebnisse Versuchsreihe LNKT mit Bauteilen/Trägern	70
Abbildung 3.22:	FE-Modell des Versuchskörpers mit äquivalenter Vergleichsspannung.....	71
Abbildung 3.23:	Ergebnisse Versuchsreihe LNKT, brenngeschnittene Kante	72
Abbildung 3.24:	Ausschnitt 3-D Modell Kleinteil-T-Probe mit X-Naht.....	73
Abbildung 3.25:	Maschinen-Kraft/-Weg-Diagramm statischer Vorversuch LUQK	74
Abbildung 3.26:	Versuchsträger für Detail „Längsnaht über Quernaht“	75
Abbildung 3.27:	Ergebnisse Versuchsreihen LUQK und LUQG	76

Abbildung 3.28:	Bruchbilder LUQK (links: Bruch an Stoß-Schweißnaht, rechts: Bruch am Übergang zur Einspannung).....	77
Abbildung 3.29:	Beispiel-Detail Bruchbild LUQK	77
Abbildung 3.30:	Ergebnisse Versuchsreihen LUQK und LUQG (Stumpfstoß)	78
Abbildung 3.31:	Versuchsschema „Stoß Walzträger“	79
Abbildung 3.32:	Schematischer Versuchsaufbau Stumpfstoß eines Walzträgers	80
Abbildung 3.33:	Versuchsaufbau Stumpfstoß eines Walzträgers	80
Abbildung 3.34:	Walzprofil-Träger mit Stumpfstoß vor dem Beizen	81
Abbildung 3.35:	Feuerverzinkung der Walzprofil-Träger mit Stumpfstoß	82
Abbildung 3.36:	DMS-Messungen statischer Vorversuch TS-Reihe.....	83
Abbildung 3.37:	Statischer Vorversuch TS-Reihe nach maximaler Belastung	83
Abbildung 3.38:	Anordnung DMS Stumpfstoß eines Walzträgers	84
Abbildung 3.39:	Spannungsverlauf im Träger	85
Abbildung 3.40:	Detail Lasteinleitung	85
Abbildung 3.41:	Messpunkte Zinkschichtdicke [91]	86
Abbildung 3.42:	Bruchbild Versuchskörper TS003	87
Abbildung 3.43:	Spannungsschwingbreite über die Versuchsdauer TS003	88
Abbildung 3.44:	Versuchswerte und Wöhlerkurve Versuchsreihe TS (Stumpfstoß Walzträger).....	90
Abbildung 3.45:	Versuchsschema Quersteife in Walzträger.....	91
Abbildung 3.46:	3-D Schema des Versuchsaufbaus WQS.....	91
Abbildung 3.47:	Versuchskörper mit Quersteife und Lasteinleitung	92
Abbildung 3.48:	DMS-Messstellen für zyklisch belastete Träger.....	94
Abbildung 3.49:	Versagen des statischen Vorversuchs WQS-Reihe.....	94
Abbildung 3.50:	DMS-Messungen an der Innenseite des Untergurts.....	95
Abbildung 3.51:	DMS-Messungen an der Unterseite des Untergurts	95
Abbildung 3.52:	Realer Spannungsverlauf an Quersteife durch Dehnbehinderung	96
Abbildung 3.53:	Messpunkte Zinkschichtdicke	97
Abbildung 3.54:	Wöhlerkurve Versuchsreihe WQS (Walzträger mit Quersteife) ...	98
Abbildung 3.55:	Bruch am Beispiel WQS004	99
Abbildung 3.56:	Spannungsschwingbreite über die Versuchsdauer WQS004	100
Abbildung 3.57:	Bruch an WQS008.....	100
Abbildung 3.58:	Abscherversuch in Anlehnung an EC4-1-1 [40].....	101
Abbildung 3.59:	Details des Versuchsaufbaus	102
Abbildung 3.60:	Versuchsaufbau PO mit Prüfmaschine	102
Abbildung 3.61:	Herstellung der Versuchskörper	103
Abbildung 3.62:	Feuerverzinkung der Push-Out-Probekörper.....	103
Abbildung 3.63:	Betoniermethoden, links horizontal, rechts gleichzeitig vertikal [131].....	104
Abbildung 3.64:	Messstellenanordnung der Abscherversuche [131].....	105
Abbildung 3.65:	DMS als Rissindikator [86].....	106
Abbildung 3.66:	Betonversagen bei statischen Vorversuchen.....	108
Abbildung 3.67:	Verformte Kopfbolzen nach statischem Versuch	109

Abbildung 3.68:	Last / Verformungsdiagramm PO-04.....	109
Abbildung 3.69:	DMS-Dehnungen bei PO-10	110
Abbildung 3.70:	Maximale DMS-Dehnungen bei PO-06	112
Abbildung 3.71:	Schlupfdifferenz bei PO-06	112
Abbildung 3.72:	Wöhlerkurve Versuchsreihe PO (Kopfbolzen auf Schub).....	114
Abbildung 4.1:	160 kN Pulser mit eingespannter Flachprobe und bildhafter Darstellung des Kraft-Zeit-Verlaufs des Versuchs	118
Abbildung 4.2:	Probenform 1, alle Angaben in mm.....	119
Abbildung 4.3:	Proben der Probenserien Aqw und Aqwz (oben) und Alf und Alfz (unten).....	119
Abbildung 4.4:	Wöhlerlinien der Serien Alw und Alwz.....	121
Abbildung 4.5:	Wöhlerlinien der Serien Aqw und Aqwz	121
Abbildung 4.6:	Wöhlerlinien der Serien Alf und Alfz.....	122
Abbildung 4.7:	Probenform 3, alle Angaben in mm.....	123
Abbildung 4.8:	Proben der Serien Fw und Fwz (oben) und F und Fz (unten)	123
Abbildung 4.9:	Oberflächenaufhärtung durch den Brennschnitt, metallographischer Schliff	124
Abbildung 4.10:	Metallographische Schliffe der Proben F (links) und Fz (rechts), Härterisse durch den Brennschnitt.....	125
Abbildung 4.11:	Wöhlerlinien der Serien F und Fz.....	125
Abbildung 4.12:	Wöhlerlinien der Probenserien Fw und Fwz, Versuche aus [136].....	126
Abbildung 4.13:	Proben der Serien Pl und Plz.....	127
Abbildung 4.14:	Wöhlerlinien der Probenserien Pl und Plz.....	128
Abbildung 4.15:	Probenform 6, alle Angaben in mm.....	129
Abbildung 4.16:	Proben der Serien Fh und Fhz.....	129
Abbildung 4.17:	Wöhlerlinien der Probenserien Fh und Fhz.....	130
Abbildung 4.18:	Probenform 2, alle Angaben in mm.....	131
Abbildung 4.19:	Proben der Serien Pln und Plnz.....	131
Abbildung 4.20:	Spritzverzinkte Probe der Serie Plnsp.....	131
Abbildung 4.21:	Metallographischer Schliff einer Probe der Serie Plnsp	132
Abbildung 4.22:	Metallographischer Schliff der Schweißnaht	132
Abbildung 4.23:	Beispielhafte Darstellung von Schweißfehlern	133
Abbildung 4.24:	Wöhlerlinien der Probenserien Pln, Plnz und Plnsp.....	134
Abbildung 4.25:	Probenform 4, alle Angaben in mm.....	135
Abbildung 4.26:	Proben der Serien Fn und Fnz.....	135
Abbildung 4.27:	Beispielhafte Schweißfehler.....	136
Abbildung 4.28:	Fnz Längsschliff, Übergang zur Schweißnahtüberhöhung.....	137
Abbildung 4.29:	Wöhlerlinien der Probenserien Fn und Fnz.....	137
Abbildung 4.30:	Probenform 5, alle Angaben in mm.....	138
Abbildung 4.31:	Proben der Serien Fq und Fqz.....	139
Abbildung 4.32:	Längsschliff einer Probe der Serie Fqz im Bereich der aufgeschweißten Quersteife.	139
Abbildung 4.33:	Wöhlerlinien der Probenserien Fq und Fqz.....	140

Abbildung 4.34:	Auswertung über alle Schwingversuche der Proben des Kerbfalls 125.....	142
Abbildung 5.1:	Wöhlerlinien der Serien Alw und Alwz; Vergleich Auswertung nach Treppenstufenverfahren und EC 3-1-9	148
Abbildung 5.2:	Probenserien Alw und Alwz, Auswertung nach Treppenstufenverfahren	149
Abbildung 5.3:	50 prozentige Dauerfestigkeit (σ_{AD50}) aller untersuchten Serien im Vergleich.....	150
Abbildung 5.4:	Beispielhafter 3-phasiger Aufbau des Zinküberzuges einer Normaltemperaturfeuerverzinkung, Schwindungsrisse.....	151
Abbildung 5.5:	Beispielhafte Charakterisierung eines Zinküberzugs mittels instrumentierter Eindringprüfung.....	152
Abbildung 5.6:	Alwz oben	152
Abbildung 5.7:	Alwz Schnittkante	153
Abbildung 5.8:	Oberflächenrauigkeiten der Serien Alw, Alwz und Alwza	154
Abbildung 5.9:	Eigenspannungen vor und nach dem Feuerverzinken.....	155
Abbildung 5.10:	Einflussgrößen für eine flüssigmetallinduzierte Rissbildung (LMAC) [1]	156
Abbildung 5.11:	DAST Richtlinie 022 „Vertrauenswahrscheinlichkeiten für Rissfreiheit“ [22].....	157
Abbildung 5.12:	Zugversuch im schmelzflüssigen Zink [78]	158
Abbildung 5.13:	Zugversuche in schmelzflüssigem Zink und in schmelzflüssigem Salz [78]	159
Abbildung 5.14:	Schematische Darstellung der Schwingversuche an U-Proben	160
Abbildung 5.15:	Vergleichende Schwingversuche an U-Proben [78]	160
Abbildung 5.16:	Ermüdungsbruchfläche einer, vor dem Schwingversuch, in Salz aufgeweiteten U-Probe. Links Übersicht mit Bruchausgang rechts unten; Rechts Detailaufnahme Rissstartbereich	161
Abbildung 5.17:	Detail aus dem Rissstartbereich in Abbildung 5.16, Bereich des Ermüdungsrissausgangs	161
Abbildung 5.18:	Ermüdungsbruchfläche einer, vor dem Schwingversuch, in Zink aufgeweiteten U-Probe	162
Abbildung 5.19:	Details aus Abbildung 5.18, Bereich des Ermüdungsrissausgangs	162
Abbildung 5.20:	EDX Mapping des Element Zn im Bereich des Ermüdungsrissausgangs	163
Abbildung 5.21:	REM Aufnahmen der Ermüdungsbruchflächen, links Probe AQW7 (unverzinkt), Amplitude 160 MPa, 600.000 Schwingspielerechts Probe AQWZ49 (verzinkt), Amplitude 115 MPa, 870.000 Schwingspiele.....	164
Abbildung 5.22:	Detailaufnahmen aus Abbildung 5.21, Bruchausgänge; links unverzinkt, rechts verzinkt	165
Abbildung 5.23:	Wöhlerlinien Alw, Alwz und Alwza	166

Abbildung 5.24:	Metallographischer Schliff eines Ermüdungsanriss.....	167
Abbildung 5.25:	Einfaches FEM Modell des Zinküberzugs mit Schwundrissen bei Belastung	168
Abbildung 6.1:	Versuchsergebnisse Blech S355 mit gefrästen Kanten	171
Abbildung 6.2:	Versuchsergebnisse Blech P460 mit Stumpfstoß	172
Abbildung 6.3:	Ausführung geschweißter Stumpfstoß, Steg (links) und Untergurt (rechts)	175
Abbildung 6.4:	Regelquerschnitt Stahlträger im Feldbereich	175
Abbildung 6.5:	Querschnitt Brücke.....	176
Abbildung 7.1:	Probekörper für die Korrosivitätsbestimmung mit Sicherungsseil an der Grundplatte	180
Abbildung 7.2:	Probekörperposition BW 142Ü2 auf der BAB A 4	181
Abbildung 7.3:	Probekörperposition Putlitz-Brücke in Berlin	181
Abbildung 7.4:	Probekörperposition Müglitzbrücke A17 bei Heidenau	181
Abbildung 7.5:	Probekörperposition Innbrücke A93 bei Kiefersfelden	181
Abbildung 7.6:	Probekörperposition Donaubrücke A3 bei Deggendorf (Deggenu)	182
Abbildung 7.7:	Probekörperposition Rader Hochbrücke A7 bei Rendsburg.....	182
Abbildung 7.8:	Querschliff Feuerverzinkung von S355J2+N.....	185
Abbildung 7.9:	Ausgangszustand der Probenoberfläche links: Shot gestrahlt, rechts: geschliffen	187
Abbildung 7.10:	Druckluftaufbereitung	188
Abbildung 7.11:	Druckluft-Strahlkabine.....	188
Abbildung 7.12:	Schematische Darstellung einer Vakuum-Saugstrahlanlage [44].....	189
Abbildung 7.13:	Schematische Darstellung Vakuum-Blasanlage [19]	190
Abbildung 7.14:	Bearbeitung einer Oberfläche mit der Nadelpistole.....	191
Abbildung 7.15:	Thermisch gespritzte Probenoberfläche links: Spritzschicht ohne Versiegelung, rechts: Spritzschicht mit Versiegelung.....	192
Abbildung 7.16:	Brucharten und Schichtenbezeichnung des Spritzzinküberzugs mit Versiegelung für den Haftabzugsversuch	193
Abbildung 7.17:	Ergebnisse der Haftfestigkeitsmessungen und Bruchbildbeurteilungen von Spritzzinküberzügen auf unterschiedlich vorbereiteten Stahloberflächen	193
Abbildung 7.18:	Beispiel für MSG geschweißte Proben (links: Stumpfnah; rechts: Kehlnah).....	195
Abbildung 7.19:	Beispiel für E-Hand geschweißte Proben (links: Stumpfnah; rechts: Kehlnah).....	195
Abbildung 7.20:	Praxisrelevante Proben mit V-Nah Stumpfstoß links: feuerverzinkt mit vorbereitetem Schweißnahbereich rechts: fertiges Korrosionsschutzsystem	196
Abbildung 7.21:	Stumpfstoß ohne Versiegelung	197
Abbildung 7.22:	Stumpfstoß mit Versiegelung	197

Abbildung 7.23:	REM-Aufnahme einer freigestrahlten Stahloberfläche Strahlmittel: Hochofenschlacke	198
Abbildung 7.24:	REM-Aufnahme einer Stahloberfläche, behandelt durch Vakuum-Saugstrahlen; Strahlmittel: Glasbruch	198
Abbildung 7.25:	REM-Aufnahme Stahloberfläche, behandelt durch Vakuum- Saugstrahlen; Strahlmittel: Granatsand	199
Abbildung 7.26:	REM-Aufnahme Stahloberfläche, behandelt durch Vakuum- Blaststrahlen; Strahlmittel: Edelmetall	199
Abbildung 7.27:	Linescan und Mapping einer lichtbogengespritzten Schicht	200
Abbildung 7.28:	Oberflächenmapping einer E-Hand geschweißten Schweißnahtoberfläche	201
Abbildung 7.29:	Schematischer Schichtaufbau im Überlappungsbereich zur Feuerverzinkung	202
Abbildung 7.30:	Schematischer Schichtaufbau im Schweißnahtbereich mit Versiegelung.....	202
Abbildung 7.31:	Bruchbilder und Haftfestigkeiten in Abhängigkeit vom Strahlverfahren ohne Versiegelung	203
Abbildung 7.32:	Bruchbilder und Haftfestigkeiten in Abhängigkeit vom Strahlverfahren mit Versiegelung.....	203
Abbildung 7.33:	Aufnahmen der Spritzgefüge Auflichtmikroskop oben und REM unten (links: Lichtbogengespritzter Zinküberzug; rechts: Flammgespritzter Zinküberzug)	204
Abbildung 7.34:	Porennachweis flammgespritzter Überzüge	205
Abbildung 7.35:	Porennachweis lichtbogengespritzter Überzüge	205
Abbildung 7.36:	Aufnahmen versiegelter Spritzgefüge mit Auflichtmikroskop oben Flammgespritzt unten Lichtbogengespritzt	206
Abbildung 7.37:	Versuchsaufbau Ammoniak-Test.....	209
Abbildung 7.38:	Auslagerung ein Jahr Stadtatmosphäre Dresden	210
Abbildung 7.39:	Auslagerung für ein Jahr forciert gemäß VDA 621-414	210
Abbildung 7.40:	Masseverlust von Proben mit einer Feuerverzinkung	211
Abbildung 7.41:	Masseverlust von Proben aus reinem Zink.....	212
Abbildung 7.42:	REM-Aufnahmen einer Probe nach 6 Zyklen VDA 621-415 Belastung.....	215
Abbildung 7.43:	REM-Aufnahme mit kombinierter EDX-Analyse einer Spritzzinkschicht nach Schwefeldioxidbelastung	216
Abbildung 7.44:	Korrosionserscheinungen an Schweißnahtfehlern (links: Schweißnahtüberhöhung; rechts: Wurzelrückfall an Wurzellage), untere Bilder Detaildarstellung.....	217
Abbildung 7.45:	Metallographische Aufnahmen der Korrosionsprodukte an der Schweißnahtflanke (SN: Schweißnaht)	218
Abbildung 7.46:	REM-Aufnahmen an Schweißnahtflanke, links: SE-Bild, rechts: EDX-Analyse.....	218
Abbildung 7.47:	Korrosiver Angriff im Übergangsbereich zwischen Feuerverzinkung und Spritzverzinkung.....	219

Abbildung 7.48:	REM-Aufnahme der Spritzmetallisierung (links) und Feuerverzinkung (rechts) an der Schadensstelle im Übergangsbereich.....	220
Abbildung 7.49:	REM-Aufnahme mit kombinierter EDX-Analyse der Schadensstelle.....	221
Abbildung 7.50:	Vorversuchsprobe bei Auslagerungsbeginn.....	223
Abbildung 7.51:	Vorversuchsprobe nach 1-jähriger Belastung VDA 621-414.....	223
Abbildung 7.52:	Festigkeitsverhalten thermisch gespritzter Zinküberzüge mit Versiegelung vor und nach einjähriger forcierter Freibewitterung	224
Abbildung 7.53:	Festigkeitsverhalten thermisch gespritzter Zinküberzüge ohne Versiegelung nach einjähriger Freibewitterung an Stadtatmosphäre Dresden	237
Abbildung 7.54:	Festigkeitsverhalten thermisch gespritzter Zinküberzüge ohne Versiegelung nach einjähriger forcierter Freibewitterung	237
Abbildung 7.55:	Festigkeitsverhalten thermisch gespritzter Zinküberzüge mit Versiegelung nach einjähriger forcierter Freibewitterung	238
Abbildung 7.56:	Theoretische Schutzdauern bis zur nächsten Korrosionsschutzmaßnahme	245
Abbildung 7.57:	Darstellung zusätzlicher Kostenquellen bei der Erneuerung von organischem Korrosionsschutz die durch die Volkswirtschaft getragen werden müssen [124].....	246
Abbildung 7.58:	Zusammensetzung der Kosten für das Korrosionsschutzsystem organische Beschichtung	250
Abbildung 7.59:	Auszug aus Broschüre Kosten im Stahlbau 2013 [7].....	252
Abbildung 7.60:	Zusammensetzung der Kosten für das Korrosionsschutzsystem Zinküberzug.....	254
Abbildung 7.61:	Verteilung der prozentualen Kostenanteile bezogen auf die Gesamtkosten der organischen Beschichtung.....	255
Abbildung 7.62:	Kostenanteile für den Korrosionsschutz, getrennt je System	255
Abbildung 7.63:	Ganzheitliche Kostenentwicklung für Wartung und Instandsetzung im gesamten Lebenszyklus, Modell realitätsnah.	257
Abbildung 8.1:	Einfluss des Si-Gehaltes im Stahl auf die Dicke der Zinküberzüge (440°C, 10 min, < 0,02 % P), [122].....	263
Abbildung 8.2:	Ausführung Montageschweißstoß.....	266

List of figures

Figure 1.1:	Hot-dip galvanized highway crossover near Stainsby Hall, UK	3
Figure 1.2:	Schematic division of experimental studies	4
Figure 2.2	Construction types of new built road bridges (Source: DEGES in [106]).....	7
Figure 2.3	Construction types of municipal road bridges [23]	8
Figure 2.4	Damages, which are relevant for the demolition of the described road bridges [23]	8
Figure 2.5	Distribution of spans of existing railway bridges [106]	9
Figure 2.6	Construction types of existing railway bridges [106]	9
Figure 2.7	Composite girder made of rolled section with in-situ concrete slab, cross section out of [106]	10
Figure 2.8	Composite precast units with rolled sections of constant height, completed with in-situ concrete slab ($d = 0.25$ m), cross-section from [106]	11
Figure 2.9	Determination of detail category for construction detail [32]	12
Figure 2.10:	Schematic SN curve, shown here with further decrease after turn-off point [87].....	18
Figure 2.11:	Schematic illustration of horizon method in the area above the fatigue limit [87].....	20
Figure 2.12:	Schematic illustration of staircase method [87].....	20
Figure 2.13:	Staircase method according to DIN 969 [24]	21
Figure 2.14	Schematic diagram of a hot-dip galvanizing process [118].....	23
Figure 2.15	Zinc film thickness in dependence of the silicon content in the steel (duration of immersion: 10 min, phosphor < 0,02 % by mass).....	25
Figure 2.16	Comparison of the structure and film thickness of hot-dip galvanizing.....	26
Figure 2.17	Structure formation during batch galvanizing.....	27
Figure 2.18	Schematic diagram of the sprayed structure	28
Figure 2.19	Geometric, real, and effective surface	28
Figure 2.20	Schematic diagram of the arc spraying [119].....	29
Figure 2.21	Schematic diagram of the wire flame spraying [119]	30
Figure 2.22	Corrosion behaviour of zinc coatings in dependence of the pH value [118].....	33
Figure 2.24	Air pollution from 1990 to 2009 in Germany [126]	36
Figure 2.29	Environmental impact, compared in different categories [52]	42
Figure 2.30	Hot-dip galvanized pedestrian bridges in Goettingen, 1988 (left) and in Rietberg, 2007 (right)	43
Figure 2.31	Bridge in Ehzerburg, Netherlands (left) and Sauk River, Washington, USA (right)	43
Figure 2.32	Hot-dip galvanized road bridge over the Lenne (D) – allowed traffic load = 12 t	44
Figure 2.33	Hot-dip galvanized road bridge over highway near Stainsby Hall, UK	44

Figure 2.34	Hot-dip galvanized road bridge in Japan.....	45
Figure 3.1:	Principle of double immersion	47
Figure 3.2:	Trough bridge – type A (RiZ S-TRO 10) [21].....	48
Figure 3.3:	Box girder structure – end cross girder (RiZ S-HOK 10) [21]	49
Figure 3.4:	Typical cross section of filler beam bridge	49
Figure 3.5:	Typical cross section of composite bridge.....	50
Figure 3.6:	Comparison normal stress distribution of compact and high girders	54
Figure 3.7:	Butt joint with varying thickness	57
Figure 3.8:	Example for composite cross section.....	58
Figure 3.9:	Principle of test sequence	60
Figure 3.10:	Principle of small scale T-specimen	61
Figure 3.11:	Principle sketch of specimen with clamping blocks and bolts	62
Figure 3.12:	Dimensions of small scale T-specimen	62
Figure 3.13:	Stress comparison full scale girder and small scale specimen	63
Figure 3.14:	Displacement transducer at small scale T-specimen	64
Figure 3.15:	Diagram of machine force/displacement for the static preliminary test LNKT.....	65
Figure 3.16:	Results test series LNKT.....	66
Figure 3.17:	Full scale specimen, detail “longitudinal fillet weld”	67
Figure 3.18:	3-D simulation of test configuration for detail „longitudinal fillet weld“	68
Figure 3.19:	Cross sections of full scale test specimens “longitudinal fillet weld”, left: LNG, right LNGL	68
Figure 3.20:	Allocation of strain gauges 4-point bending test „longitudinal fillet weld“	69
Figure 3.21:	Results of test series “longitudinal fillet weld” with full scale specimens.....	70
Figure 3.22:	FE model of small scale T-specimen with equivalent stress	71
Figure 3.23:	Results test series LNKT, flame-cut edges	72
Figure 3.24:	Detail of 3-D model small scale T-specimen double-V butt- weld.....	73
Figure 3.25:	Diagram of machine force/displacement for the static preliminary test LUQK.....	74
Figure 3.26:	Full scale specimen, detail “longitudinal fillet weld over butt weld”	75
Figure 3.27:	Results of test series LUQK and LUQG	76
Figure 3.28:	Fracture pattern LUQK (left: crack at butt weld, right: crack near clamping)	77
Figure 3.29:	Example detail fracture pattern LUQK.....	77
Figure 3.30:	Results of test series LUQK and LUQG (butt weld)	78
Figure 3.31:	Full scale specimen, detail “butt weld of rolled girder”	79
Figure 3.32:	Schematic test configuration for detail „butt weld of rolled girder“	80
Figure 3.33:	Test configuration “butt weld of rolled girder”	80

Figure 3.34:	Rolled section girder with butt weld before pickling	81
Figure 3.35:	Hot-dip galvanizing of rolled section girders with butt weld.....	82
Figure 3.36:	Strain gauge measurements of static preliminary test TS series	83
Figure 3.37:	Static preliminary test TS series after the maximum loading	83
Figure 3.38:	Allocation of strain gauges butt weld of rolled girder	84
Figure 3.39:	stress distribution in the cross section	85
Figure 3.40:	Detail load transmission into girder.....	85
Figure 3.41:	Measurement point for thickness of zinc coating [91]	86
Figure 3.42:	Fracture pattern specimen TS003	87
Figure 3.43:	Stress range over test duration TS003	88
Figure 3.44:	Test results and SN-curve test series TS (butt weld of rolled girder)	90
Figure 3.45:	Full scale specimen, detail stiffener in rolled section girder	91
Figure 3.46:	3-D simulation of test configuration for detail.....	91
Figure 3.47:	Specimen with stiffener and load transmission.....	92
Figure 3.48:	Allocation of strain gauges for cyclic loaded specimens	94
Figure 3.49:	Damage of static preliminary test WQS series	94
Figure 3.50:	Measurement of strain gauges at inner face of bottom flange	95
Figure 3.51:	Measurement of strain gauges at outer face of bottom flange	95
Figure 3.52:	Real stress distribution at stiffener by obstruction of elongation	96
Figure 3.53:	Measurement points of zinc coating thickness	97
Figure 3.54:	SN-curve test series WQS (stiffeners in rolled section girders) ...	98
Figure 3.55:	Example for crack at WQS004	99
Figure 3.56:	Stress range over test duration WQS004	100
Figure 3.57:	Crack at WQS008.....	100
Figure 3.58:	Push out test in dependence on EC4-1-1 [40].....	101
Figure 3.59:	Details of test set-up.....	102
Figure 3.60:	Test configuration PO with testing machine.....	102
Figure 3.61:	Manufacture of test specimens.....	103
Figure 3.62:	Hot-dip galvanizing of push out specimens	103
Figure 3.63:	Methods of placing the concrete, left: horizontal, right: vertikal [131].....	104
Figure 3.64:	Allocation of measurement points at push out specimens [131].....	105
Figure 3.65:	Strain gauges as indicator for cracks [86].....	106
Figure 3.66:	Damage of concrete in preliminary tests.....	108
Figure 3.67:	Deformed studs after static preliminary test.....	109
Figure 3.68:	Load / displacement diagram PO-04	109
Figure 3.69:	Strain gauge diagram for PO-10.....	110
Figure 3.70:	Maximum strain of strain gauges at PO-06.....	112
Figure 3.71:	Difference of displacement at PO-06.....	112
Figure 3.72:	SN-curve test series PO (studs with shear)	114

Figure 4.1:	160 kN Pulser with clamped flat specimen and schematic representation of the SN test	118
Figure 4.2:	Sample form 1, all dimensions in mm	119
Figure 4.3:	Samples of the series Aqw and Aqwz (top) and Alf and Alfz (below)	119
Figure 4.4:	SN curves of the series Alw and Alwz.....	121
Figure 4.5:	SN curves of the series Aqw and Aqwz	121
Figure 4.6:	SN curves of the series Alf and Alfz.....	122
Figure 4.7:	Sample Form 3, all dimensions in mm	123
Figure 4.8:	Samples of the series Fw and FEZ (top) and F and Fz (bottom).....	123
Figure 4.9:	Beam hardening, metallography	124
Figure 4.10:	Metallographic sections of the samples F (left) and Fz (right), hardness cracks through the combustion section	125
Figure 4.11:	SN curves of Series F and Fz	125
Figure 4.12:	SN curves of test series Fw and Fwz, experiments from [136] ..	126
Figure 4.13:	Samples of the series Pl and Plz	127
Figure 4.14:	SN curves of test series Pl and Plz	128
Figure 4.15:	Sample Form 6, all dimensions in mm	129
Figure 4.16:	Specimens of series Fh and Fhz.....	129
Figure 4.17:	SN curves of test series Fh and Fhz	130
Figure 4.18:	Sample Form 2, all dimensions in mm	131
Figure 4.19:	Samples of the series Pln and Plnz	131
Figure 4.20:	Sample of the series Plnsp, sprayed zinc	131
Figure 4.21:	Metallographic section of a sample Specimen of series Plnsp...	132
Figure 4.22:	Metallographic section of the weld	132
Figure 4.23:	Exemplary welding defects	133
Figure 4.24:	SN curves of test series Pln, Plnz and Plnsp	134
Figure 4.25:	Sample Form 4, all dimensions in mm	135
Figure 4.26:	Samples of the series Fn and Fnz	135
Figure 4.27:	Exemplary welding defects	136
Figure 4.28:	Fnz section of the seam	137
Figure 4.29:	SN curves of test series Fn and Fnz	137
Figure 4.30:	Sample Form 5, all dimensions in mm	138
Figure 4.31:	Samples of the series Fq and Fqz	139
Figure 4.32:	Longitudinal section of a sample in the series Fqz in the field of welded transverse stiffener	139
Figure 4.33:	SN curves of test series Fq and Fqz	140
Figure 4.34:	Evaluation of all SN tests of samples of the detail category 125.....	142
Figure 5.1:	SN curves of the series Alw and Alwz; comparison evaluation according to staircase method and EC 3-1-9.....	148
Figure 5.2:	Test series Alw and Alwz, evaluation with staircase method	149
Figure 5.3:	50 percent fatigue (σ_{AD50}) of all series in comparison	150
Figure 5.4:	Example of a 3-phase construction zinc coating, cracks.....	151

Figure 5.5:	Exemplary characterization of a zinc coating using nano indenter.....	152
Figure 5.6:	Alwz upside	152
Figure 5.7:	Alwz cutting edge.....	153
Figure 5.8:	Surface roughness of the series Alw, Alwz and Alwza	154
Figure 5.9:	Residual stress before and after the hot-dip galvanizing	155
Figure 5.10:	Factors for a liquid metal assisted cracking	156
Figure 5.11:	DASr Richtlinie 022 "confidence probabilities for cracks"	157
Figure 5.12:	Tensile test in molten zinc	158
Figure 5.13:	Tensile tests in molten zinc and molten salt	159
Figure 5.14:	Schematic representation of the fatigue tests on U-samples.....	160
Figure 5.15:	Comparative fatigue tests of U-samples.....	160
Figure 5.16:	U-sample expanded in salt; Fatigue fracture surface.....	161
Figure 5.17:	Detail from Figure 5.16, area of fatigue crack start.....	161
Figure 5.18:	U-sample expanded in zinc; fatigue fracture surface	162
Figure 5.19:	Details from Figure 5.18, area of fatigue crack start	162
Figure 5.20:	EDX mapping of the element Zn in the area of fatigue crack start.....	163
Figure 5.21:	SEM shots of the fatigue fracture surfaces, left non-galvanized, right galvanized	164
Figure 5.22:	Details from Figure 5.21, fracture starts; left non-galvanized, right galvanized.....	165
Figure 5.23:	SN curves Alw, Alwz and Alwza	166
Figure 5.24:	Metallographic section of a fatigue crack initiation.....	167
Figure 5.25:	Simple FEM model of the zinc coating with cracks under load ..	168
Figure 6.1:	Test results of plate S355 with milled edges.....	171
Figure 6.2:	Test results of plate P460 with butt weld	172
Figure 6.3:	Manufacture of welded butt joint, web (left) and lower flange (right)	175
Figure 6.4:	Standard cross-section of steel girder in the field area	175
Figure 6.5:	Cross section of bridge	176
Figure 7.1:	Test specimen for the determination of corrosivity with safety rope at the baseplate	180
Figure 7.2:	Position of the test specimen BW 142Ü2 on the motorway A 4 ..	181
Figure 7.3:	Position of the test specimen Putlitz bridge in Berlin	181
Figure 7.4:	Position of the test specimen Müglitz bridge A17 near Heidenau	181
Figure 7.5:	Position of the test specimen Inn bridge A93 near Kiefersfelden.....	181
Figure 7.8:	Cross-section hot-dip galvanizing of S355J2+N	185
Figure 7.9:	Initial condition of the surface of the test specimen left: shot-blasted, right: sanded	187
Figure 7.10:	Pressurized-air conditioning	188
Figure 7.11:	Pressurized air blasting cubicle	188
Figure 7.12:	Schematic diagram of a vacuum-suction blasting plant.....	189

Figure 7.13:	Schematic diagram vacuum-blasting plant.....	190
Figure 7.14:	Processing of a surface by means of a needle descaler	191
Figure 7.15:	Thermal-sprayed surface of a test specimen left: sprayed film without sealing, right: sprayed film with sealing	192
Figure 7.16:	Types of failure and film identification of the sprayed zinc coating with sealing for testing the tensile bond strength	193
Figure 7.17:	Results of the adhesive strength measurements and evaluations of the failure patterns of sprayed zinc coatings on different pre-treated steel surfaces	193
Figure 7.18:	Example for MIG welded test specimens (left: butt weld; right: fillet weld)	195
Figure 7.19:	Example for rod welded test specimens (left: butt weld; right: fillet weld)	195
Figure 7.20:	Practice-oriented test specimens with single-V butt weld butt joint left: hot-dip galvanized with prepared welding seam area right: completed corrosion protection system.....	196
Figure 7.21:	Butt joint without sealing	197
Figure 7.22:	Butt joint with sealing	197
Figure 7.23:	SEM image of a blast-cleaned steel surface blast-cleaning abrasive: blast-furnace slag	198
Figure 7.24:	SEM image of a steel surface, treated by means of vacuum- suction blast cleaning; blast-cleaning abrasive: cullet.....	198
Figure 7.25:	SEM image steel surface, treated by means of vacuum- suction blast cleaning; blast-cleaning abrasive: garnet sand	199
Figure 7.26:	SEM image steel surface, treated by means of vacuum blast- cleaning; blast-cleaning abrasive: aluminium oxide	199
Figure 7.27:	Line scan and mapping of an arc-sprayed film.....	200
Figure 7.28:	Surface mapping of a rod-welded welding seam surface.....	201
Figure 7.29:	Schematic coating system in the area overlapping the hot-dip galvanizing	202
Figure 7.30:	Schematic coating system in the area of the welding seam with sealing	202
Figure 7.31:	Failure patterns and adhesive strengths depending on the blast-cleaning method without sealing	203
Figure 7.32:	Failure patterns and adhesive strengths depending on the blast-cleaning method with sealing	203
Figure 7.33:	Images of the sprayed structures reflected-light microscope above and SEM below (left: arc-sprayed zinc coating; right: flame-sprayed zinc coating)	204
Figure 7.34:	Pore analysis of flame-sprayed coatings.....	205
Figure 7.35:	Pore analysis of arc-sprayed coatings	205
Figure 7.36:	Images of sealed sprayed structures with reflected-light microscope above flame-sprayed below arc-sprayed	206
Figure 7.37:	Arrangement ammonia test.....	209
Figure 7.38:	One year of exposure in urban climate Dresden.....	210

Figure 7.39:	One year of forced exposure in accordance with VDA 621-414.....	210
Figure 7.40:	Loss in mass of test specimens with hot-dip galvanizing.....	211
Figure 7.41:	Loss in mass of test specimens made of pure zinc.....	212
Figure 7.42:	SEM images of a test specimen after 6 cycles of VDA 621-415 stress application	215
Figure 7.43:	SEM image with combined EDX analysis of a sprayed zinc film after sulphur dioxide stress application	216
Figure 7.44:	Corrosion on welding seam defects (left: excessive peaking of the welding seam; right: underwashing on root run), lower figures detailed illustration	217
Figure 7.45:	Metallographic images of the corrosion products on the side of the welding seam (SN: welding seam).....	218
Figure 7.46:	SEM images on the side of the welding seam, left: SE image, right: EDX analysis	218
Figure 7.47:	Corrosive attack in the transition area between hot-dip galvanizing and spray-galvanizing	219
Figure 7.48:	SEM image of the metal-spraying (left) and hot-dip galvanizing (right) on the defect in the transition area	220
Figure 7.49:	SEM image with combined EDX analysis of the defect	221
Figure 7.50:	Pre-test test specimen upon starting exposure.....	223
Figure 7.51:	Pre-test test specimen after one year of stress application VDA 621-414	223
Figure 7.52:	Strength behaviour of thermal-sprayed zinc coatings with sealing prior to and after one year of forced natural weathering	224
Figure 7.53:	Strength behaviour of thermal-sprayed zinc coatings without sealing after one year of natural weathering in urban climate Dresden	237
Figure 7.54:	Strength behavior of thermal-sprayed zinc coatings without sealing after one year of forced natural weathering	237
Figure 7.55:	Strength behaviour of thermal-sprayed zinc coatings with sealing after one year of forced natural weathering	238
Figure 7.56:	Theoretical protection period until next maintenance of corrosion protection	245
Figure 7.57:	Illustration of additional cost sources for the renewal of organic corrosion protection, which have to be borne by the national economy [124].....	246
Figure 7.58:	Composition of costs for an organic coating as corrosion protection system.....	250
Figure 7.59:	Excerpt from brochure Kosten im Stahlbau 2013 [7]	252
Figure 7.60:	Composition of costs for hot-dip galvanizing as corrosion protection system.....	254
Figure 7.61:	Distribution of percentage costs based on the total cost of the organic coating	255

Figure 7.62:	Percentage costs for corrosion protection, separately for each system.....	255
Figure 7.63:	Comprehensive development of costs for maintenance and repair in the entire life cycle, model close to reality.	257
Figure 8.1:	Influence of Si-content in the steel on the thickness of zinc coating (440°C, 10 min, < 0,02 % P), [122].....	263
Figure 8.2:	Execution of mounting joint.....	266

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Begriffe der Ermüdungsfestigkeit [87].....	18
Tabelle 2.2:	Eigenschaften von Zinküberzügen aus konventionellen Zinkschmelzen.....	24
Tabelle 2.3	Chemische Zusammensetzung von Zink-Eisenphasen [110].....	26
Tabelle 2.4	Korrosivitätskategorien für atmosphärische Umgebungsbedingungen [57].....	38
Tabelle 3.1:	Übersicht der maßgebenden Kerbdetails	55
Tabelle 3.2:	Ergebnisse der Kleinteil-T-Proben „Längsnaht“	66
Tabelle 3.3:	Ergebnisse Bauteil-Proben „Längsnaht“	70
Tabelle 3.4:	Ergebnisse der Kleinteil-T-Proben brenngeschnittene Kante am Detail Längsnaht.....	71
Tabelle 3.5:	Ergebnisse aller Proben „durchgehende Längsnaht über Quernaht“	75
Tabelle 3.6:	Profil-Kennwerte HEB 400.....	81
Tabelle 3.7:	Messwerte der Zinkschichtdicke [91].....	86
Tabelle 3.8:	Ergebnisse „Stumpfstoß Walzträger“	89
Tabelle 3.9:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche Serie TS, 2. Teil	89
Tabelle 3.10:	Profil-Kennwerte IPE 270	92
Tabelle 3.11:	Messwerte der Zinkschichtdicke	97
Tabelle 3.12:	Ergebnisse „Walzträger mit Quersteife“	98
Tabelle 3.13:	Betonfestigkeiten Abscherversuche.....	104
Tabelle 3.14:	Maßgebende Lasten statische Vorversuche.....	108
Tabelle 3.15:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche 1. Teil	111
Tabelle 3.16:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche Serie PO, 2. Teil.....	113
Tabelle 4.1:	Flachproben ohne Schweißnaht	116
Tabelle 4.2:	Flachproben mit Schweißnaht	117
Tabelle 4.3	Wichtige Kenngrößen der Probenserien Alw, Alwz, Aqw, Aqwz, Alf und Alfz.....	120
Tabelle 4.4	Wichtige Kenngrößen der Probenserien F, Fz, Fw und Fwz	124
Tabelle 4.5	Wichtige Kenngrößen der Probenserien Pl und Plz.....	127
Tabelle 4.6	Wichtige Kenngrößen der Probenserien Fh und Fhz.....	129
Tabelle 4.7	Wichtige Kenngrößen der Probenserien Pln und Plnz.....	133
Tabelle 4.8	Wichtige Kenngrößen der Probenserien Fn und Fnz.....	136
Tabelle 4.9	Wichtige Kenngrößen der Probenserien Fq und Fqz.....	139
Tabelle 4.10	Zusammenfassung der Ermüdungsversuche an ungeschweißten Flachproben.....	142
Tabelle 4.11	Zusammenfassung der Ermüdungsversuche an geschweißten Flachproben.....	143
Tabelle 6.1:	Kerbfälle für feuerverzinkten Stahl.....	173
Tabelle 7.1:	Ermittelte Korrosivitätskategorien nach dem 1. Auslagerungsjahr.....	182
Tabelle 7.2:	Ermittelte Salzbelegung auf Grundplatten der Probekörper	183
Tabelle 7.3:	Ergebnisse der Oberflächenvorbereitung	191
Tabelle 7.4:	Ergebnisse Schichtdickenmessung	192

Tabelle 7.5:	Gemessene Rautiefen auf gestrahlten Oberflächen	197
Tabelle 7.6:	Ergebnisse der Schichtdickenmessung an 54 Proben (jeweils 8 Einzelmesswerte je Probe)	201
Tabelle 7.7:	Gegenüberstellung der durchgeführten Laborbelastungen	208
Tabelle 7.8:	Probenoberfläche nach 6 Zyklen Laborbelastung lichtbogengespritzter Überzug	213
Tabelle 7.9:	Probenoberfläche nach 6 Zyklen Laborbelastung flammgespritzter Überzug	214
Tabelle 7.10:	Vergleich versiegelter lichtbogengespritzter Zinküberzüge vor und nach forcierter Belastung	225
Tabelle 7.11:	Vergleich versiegelter flammgespritzter Zinküberzüge vor und nach forcierter Belastung	226
Tabelle 7.12:	Visuelles Erscheinungsbild der V-Naht Stumpfstoß Proben nach einjähriger Freibewitterung an Stadtatmosphäre Dresden	228
Tabelle 7.13:	Visuelles Erscheinungsbild der Kehlnaht T-Stoß Proben nach einjähriger Freibewitterung an Stadtatmosphäre Dresden	229
Tabelle 7.14:	Visuelles Erscheinungsbild der V-Naht Stumpfstoßproben Spritzmetallisierung nicht versiegelt nach einjähriger forcierter Belastung gemäß VDA 621-414	231
Tabelle 7.15:	Visuelles Erscheinungsbild der V-Naht Stumpfstoßproben Spritzmetallisierung versiegelt nach einjähriger forcierter Belastung gemäß VDA 621-414	232
Tabelle 7.16:	Visuelles Erscheinungsbild Kehlnaht T-Stoß-Proben nach einjähriger forcierter Belastung gemäß VDA 621-414 horizontal gelagert	233
Tabelle 7.17:	Visuelles Erscheinungsbild Kehlnaht T-Stoß-Proben nach einjähriger forcierter Belastung gemäß VDA 621-414 vertikal gelagert	235
Tabelle 7.18:	Darstellung lichtbogengespritzter Überzüge nach Freibewitterung im Querschliff	240
Tabelle 7.19:	Darstellung flammgespritzter Überzüge nach Freibewitterung im Querschliff	241
Tabelle 7.20:	Theoretisch notwendige Überzugsdicke des Zinks berechnet gemäß DIN EN ISO 9224:2012 [73] mithilfe der Werte aus Tabelle B.1	244
Tabelle 7.21:	Kostenstellen der organischen Beschichtung am Beispiel des Wirtschaftsweges	249
Tabelle 7.22:	Kostenstellen bei feuerverzinktem Korrosionsschutz	252
Tabelle 7.23:	Zusammenstellung der Fix-Kosten des Baustellenstoßes am Beispiel-Objekt	253
Tabelle 7.24:	Mengenabhängige Kosten für den Korrosionsschutz im Baustellenstoß-Bereich	253
Tabelle 7.25:	Mehr- und Minderkosten im direkten Vergleich, nach Kostenstellen geordnet	255

List of tables

Table 2.1:	Terms of fatigue strength [87]	18
Table 2.2:	Properties of zinc coatings made of conventional zinc melts	24
Table 2.3	Chemical composition of zinc-iron phases [110]	26
Table 2.4	Corrosivity categories for atmospheric ambient conditions [57] ...	38
Table 3.1:	Overview of the relevant notch details	55
Table 3.2:	Results of small scale T-specimens “longitudinal fillet weld”	66
Table 3.3:	Results of full scale tests “longitudinal fillet weld”	70
Table 3.4:	Results of small scale T-specimens “longitudinal fillet weld” with flame-cut edges	71
Table 3.5:	Results of all tests “longitudinal fillet weld over butt weld”	75
Table 3.6:	Characteristics of rolled section HEB 400	81
Table 3.7:	Measurement results of zinc coating thickness [91]	86
Table 3.8:	Results „butt weld of rolled girder“	89
Table 3.9:	Results of fatigue test series TS, part 2	89
Table 3.10:	92	
Table 3.11:	Results of thickness measurement	97
Table 3.12:	Results “stiffeners in rolled section girders”	98
Table 3.13:	Concrete strength push out tests	104
Table 3.14:	Decisive loads of static preliminary tests.....	108
Table 3.15:	Results of fatigue tests, part 1	111
Table 3.16:	Results of fatigue tests, series PO, part 2	113
Table 4.1:	Flat specimen without weld seam	116
Table 4.2:	Flat specimen with weld seam	117
Table 4.3	Important characteristics of the test series Alw, Alwz, Aqw, Aqwz, Alf and Alfz	120
Table 4.4	Important characteristics of the test series F, Fz, Fw and Fwz ..	124
Table 4.5	Important characteristics of the test series Pl and Plz.....	127
Table 4.6	Important characteristics of the test series Fh and Fhz.....	129
Table 4.7	Important characteristics of the test series Pln and Plnz.....	133
Table 4.8	Important characteristics of the test series Fn and Fnz.....	136
Table 4.9	Important characteristics of the test series Fq and Fqz.....	139
Table 4.10	Summary of fatigue tests on non-welded flat specimens	142
Table 4.11	Summary of fatigue tests on welded flat specimens	143
Table 6.1:	Detail categories for hot-dip galvanized steel.....	173
Table 7.1:	Determined corrosivity categories after the 1 st year of exposure	182
Table 7.2:	Determined salt accumulation on substrates of the test specimens.....	183
Table 7.3:	Results of the surface preparation	191
Table 7.4:	Results film thickness measurements.....	192
Table 7.5:	Measured surface roughness on blast-cleaned surfaces.....	197
Table 7.6:	Results of the film thickness measurement on 54 test specimens (in each case 8 single measuring values for each test specimen).....	201

Table 7.7:	Comparison of the carried out laboratory stress applications	208
Table 7.8:	Surface of the test specimens after 6 cycles laboratory stress application arc-sprayed coating	213
Table 7.9:	Surface of the test specimens after 6 cycles laboratory stress application flame-sprayed coating	214
Table 7.10:	Comparison of sealed arc-sprayed zinc coatings prior to and after forced stress application.....	225
Table 7.11:	Comparison of sealed flame-sprayed zinc coatings prior to and after forced stress application.....	226
Table 7.12:	Visual appearance of the single-V butt weld butt joint test specimens after one year of natural weathering in urban climate Dresden.....	228
Table 7.13:	Visual appearance of the fillet weld T joint test specimens after one year of natural weathering urban climate Dresden	229
Table 7.14:	Visual appearance of the single-V butt weld butt joint test specimens metal spraying unsealed after one year of forced stress application in accordance with VDA 621-414.....	231
Table 7.15:	Visual appearance of the single-V butt weld butt joint test specimens metal spraying sealed after one year of forced stress application in accordance with VDA 621-414.....	232
Table 7.16:	Visual appearance fillet weld T-butt test specimens after one year of forced stress application in accordance with VDA 621-414, stored horizontally.....	233
Table 7.17:	Visual appearance fillet weld T-butt test specimens after one year of forced stress application in accordance with VDA 621-414, stored vertically.....	235
Table 7.18:	Illustration arc-sprayed coatings after natural weathering (cross section)	240
Table 7.19:	Illustration flame-sprayed coatings after natural weathering (cross section)	241
Table 7.20:	Theoretical necessary zinc coating thickness, calculated according to DIN EN ISO 9224:2012 [73], by means of the values of Table B.1	244
Table 7.21:	Cost types for the organic coating using the example of a rural road	249
Table 7.22:	Cost types for hot-dip galvanizing.....	252
Table 7.23:	Composition of fix-costs of the mounting joint using the example object	253
Table 7.24:	Quantity-based costs for corrosion protection in the mounting joint area.....	253
Table 7.25:	Additional or reduced costs in direct comparison, ordered by cost types	255

Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols

An dieser Stelle sind die häufig verwendeten Symbole aufgeführt. Definitionen weiterer, an dieser Stelle nicht näher aufgeführten Symbole, sind direkt im Text gegeben.

Allgemeine Abkürzungen

bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
DAST	Deutscher Ausschuss für Stahlbau
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
EN	Europäische Norm
ISO	International Organization for Standardization
MQG	Methode der kleinsten Quadrate
TL	Technische Lieferbedingungen
u.a.	unter anderem
VDA	Verband der Automobilindustrie
WIB	Walzträger im Beton
z.B.	zum Beispiel
ZTV – ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

Querschnittsgrößen

t	Deckblechdicke
A	Querschnittsfläche

Physikalische Kenngrößen, Festigkeiten

E	Elastizitätsmodul (Stahl: 210.000 N/mm ² , wenn nicht anders angegeben)
R _{eH}	Streckgrenze Stahl
R _m	Bruchfestigkeit Stahl

Spannungs- und Beanspruchungsgrößen

$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite: Differenz aus Maximal- und Minimalspannung
R	Schwingbreitenverhältnis: Quotient aus Minimal- und Maximalspannung

Abkürzungen im Bereich Korrosionsschutz

KFW	Kondenswasser-Wechselklima mit Wechsel von Luftfeuchte und -temperatur
NSS	Neutraler Salzsprühnebel

1 Einleitung

1 Introduction

Kurzfassung

Das Feuerverzinken von Stahlbauteilen ist im Vergleich zu den üblicherweise im Brückenbau verwendeten organischen Korrosionsschutzbeschichtungen ein sehr langlebiger und robuster Korrosionsschutz, der im Stahlhochbau schon seit langem eingesetzt wird. Durch den ausgezeichneten Korrosionsschutz der Feuerverzinkung sind Instandhaltungsmaßnahmen und die damit verbundenen Nutzungseinschränkungen minimiert, wodurch sich in der Nutzungsdauer des Bauwerks erhebliche Kosten einsparen lassen. Bei zyklisch belasteten Stahl- und Verbundbrücken lassen sich diese ökologischen und ökonomischen Vorteile zurzeit nicht ausnutzen, da die Auswirkung der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit der Stahlbauteile noch nicht ausreichend untersucht wurde.

In diesem Kapitel werden der Forschungsanlass, die Ziele des Vorhabens sowie die grundsätzliche Herangehensweise dargestellt.

Abstract

Compared to conventional corrosion protection measures, the hot-dip galvanization of steel building elements is a very long lasting and durable type of corrosion protection that has been used for many decades in steel building construction. The excellent corrosion protection of hot-dip galvanization minimizes maintenance and the associated restrictions of use, providing significant cost savings during the life of the building. These ecological and economic advantages cannot currently be taken advantage of in steel and composite bridge construction, because the effect of hot-dip galvanization on fatigue strength due to the cyclical action of traffic load on the steel construction components has not yet been sufficiently analyzed.

The initial situation, the objectives of the project and the general approach are presented in this chapter.

1.1 Forschungsanlass

1.1 Initial situation

Für den Korrosionsschutz von atmosphärisch beanspruchten Stahlbauteilen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung hat sich das Feuerverzinken bewährt, eine Korrosionsschutzdauer von vielen Jahrzehnten ohne Wartung und Instandhaltung ist die Regel. Daher stimmt bei vielen feuerverzinkten Bauwerken die Korrosionsschutzdauer der Feuerverzinkung mit der Nutzungsdauer des Bauwerkes überein. Im Vergleich zu han-

delsüblichen organischen Korrosionsschutzsystemen, die erfahrungsgemäß in Abständen von 25-33 Jahren erneuert werden müssen, ist Feuerverzinken unter Einbezug der Nutzungsdauer von Stahlbauten die wirtschaftlichste Korrosionsschutzmaßnahme. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Stahlkonstruktion für eine Instandhaltungsmaßnahme nur noch schwer oder gar nicht zugänglich ist oder die Nutzung des Bauwerks durch die Instandhaltungsmaßnahme eingeschränkt wird. Dabei ist die Schutzdauer eines Zinküberzugs abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Stahls und der Dicke der Feuerverzinkung, der Ausführung des Korrosionsschutzes an den Montageschweißstößen und den tatsächlich vorliegenden Belastungsbedingungen der Atmosphäre.

Stahl- und Stahlverbundbrücken haben im Vergleich zu Massivbrücken wesentliche wirtschaftliche Vorteile, wenn für den Neubau nicht nur die reinen Neubaukosten, sondern auch die Nutzungsdauer und die erwarteten Folgekosten durch z.B. Wartung und Instandhaltung in die Beurteilung mit einfließen. Diese gesamtheitlichen Bewertungskriterien wurden in das Anfang 2007 eingeführte neue Vergaberecht aufgenommen, auf deren Grundlage zukünftig die fast ausschließlich mit öffentlichen Geldern finanzierten Brückenbauwerke zu vergeben sind. Vor diesem Hintergrund kann mit Blick auf den Brückenbau, wo eine Nutzungsdauer von 100 Jahren vorausgesetzt wird, prognostiziert werden, dass die Marktanteile des Stahl- und Verbundbrückenbaus wegen der zu erzielenden Kostenvorteile massiv steigen werden.

Wesentliche Vorteile der Feuerverzinkung wie die lange Schutzdauer, der Wegfall von Instandhaltungsmaßnahmen und die damit verbundenen geringeren Kosten für Wartung, Instandhaltung und Nutzungseinschränkung können im Stahl- und Verbundbrückenbau jedoch zurzeit nicht genutzt werden. Die Nutzungsdauer von Stahl- und Verbundbrückenkonstruktionen wird sowohl durch Umweltbedingungen (Korrosionsbelastung) als auch durch ihre Nutzung (Ermüdung und fortschreitende Rissbildung in der Konstruktion infolge hoher zyklischer Verkehrsbeanspruchungen) beeinflusst. Weil wesentliche wissenschaftliche Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten feuerverzinkter Brückenkonstruktionen und -details unter zyklischen Verkehrsbeanspruchungen fehlen, kann der für den bautechnischen Nachweis zu erbringende Ermüdungsnachweis nach Eurocode 3 (DIN EN 1993-2) bzw. Eurocode 4 (DIN EN 1994-2) nicht erbracht werden. Außerdem fehlen wissenschaftliche Untersuchungen zum Korrosionsschutzverhalten einer Feuerverzinkung vor dem Hintergrund einer 100-jährigen Nutzungsdauer im Brückenbau bei Belastung unter aktuellen und spezifischen klimatischen Bedingungen.

Derzeit kommt das Feuerverzinken für Verkehrswegebrücken in Stahl- und Verbundbauweise fast nicht zum Einsatz. Ausnahmen sind verzinkte Fußwegbrücken, verzinkte Stahlbrücken mit geringer Verkehrsbeanspruchung und untergeordnete, verzinkte Bauteile (Geländer) auf Stahl- und Verbundbrücken, die jedoch keiner nennenswerten zyklischen Beanspruchung unterliegen und somit in die Kategorie „vorwiegend ruhend beansprucht“ eingestuft werden können.



Abbildung 1.1: Feuerverzinkte Autobahn-Überführung bei Stainsby Hall, UK
Figure 1.1: Hot-dip galvanized highway crossover near Stainsby Hall, UK

Eine der wenigen Ausnahmen bildet eine einfache Straßenbrücken-Konstruktionen in England (Abbildung 1.1 [50]), bei der verzinkte Walzprofile ohne zusätzliche konstruktive Bauteile wie Steifen, Schraub- oder Schweißverbindungen und ohne Verbundwirkung mit der aufliegenden Beton-Fahrbahnplatte zum Einsatz kommen. Diese Ausführungsart ist zwar ermüdungsarm, entspricht jedoch nicht den anerkannten Regeln der Brückenbautechnik und -konstruktion, da der Stahlquerschnitt statisch-konstruktiv nicht ausgenutzt wird. Die Bauweise belegt aber, dass feuerverzinkte Stahlkonstruktionen auch bei zyklischer Beanspruchung grundsätzlich verwendet werden können.

1.2 Ziele des Forschungsvorhabens

1.2 Goals of the research project

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung und Bereitstellung aller notwendigen wissenschaftlich und technisch erforderlichen Erkenntnisse zur Verwendung der Feuerverzinkung bei einer für den Brückenbau angestrebten Nutzungsdauer von 100 Jahren.

Hierfür werden die für den baupraktischen Ermüdungsnachweis nach Eurocode 3 (DIN EN 1993-1-9) [32] erforderlichen Voraussetzungen inkl. Kerbdetails bereitgestellt. Die Untersuchungen umfassen die gängigen Kerbdetails einfacher Stahl- und Verbundbrücken kleiner und mittlerer Spannweiten mit offenen Walz- bzw. geschweißten Profilen.

Dabei wird auch die Wirkung möglicher durch die Feuerverzinkung bedingter Anfangsdefekte unterhalb der Nachweisgrenze üblicher zerstörungsfreier Prüfmethoden untersucht. Sowohl die Auswirkungen einer Feuerverzinkung auf den Grundwerkstoff Stahl bzw. auf ein Stahlprofil werden unter besonderer Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit untersucht als auch die statisch-konstruktiven und montagetechnischen Kerbdetails typischer Stahl- und Verbundbrückenkonstruktionen. Dabei werden auch die neuesten Erkenntnisse zum Schädigungsmechanismus der flüssigmetallinduzierten Spannungsrisskorrosion beim Feuerverzinken (LMAC) berücksichtigt.

Ausgehend vom aktuellen Stand in der Technologie des Feuerverzinken und der Gestaltung von Stahl- und Verbundbrücken sollen alle wesentlichen Regeln zur Verwendung der Feuerverzinkung im Stahl- und Verbundbrückenbau bereitgestellt werden.

Um die Anwendungsmöglichkeiten zu erhöhen, werden Ausführungsempfehlungen zur Wiederherstellung des Korrosionsschutzes nach dem Feuerverzinken für geschweißte Montagestöße und (Transport-)Beschädigungen mittels thermischen Spritzens durch Zink erarbeitet. Des Weiteren wird eine Lebensdauerprognose für das Korrosionsschutzsystem Zinküberzug in Abhängigkeit klimatischer Umgebungsbedingungen und örtlicher Korrosivität gegeben. Daraus kann dann auch eine Abschätzung hinsichtlich der erwarteten Kosten und eine überschlägige Vergleichsrechnung mit einem herkömmlichen organischen Korrosionsschutzsystem erstellt werden.

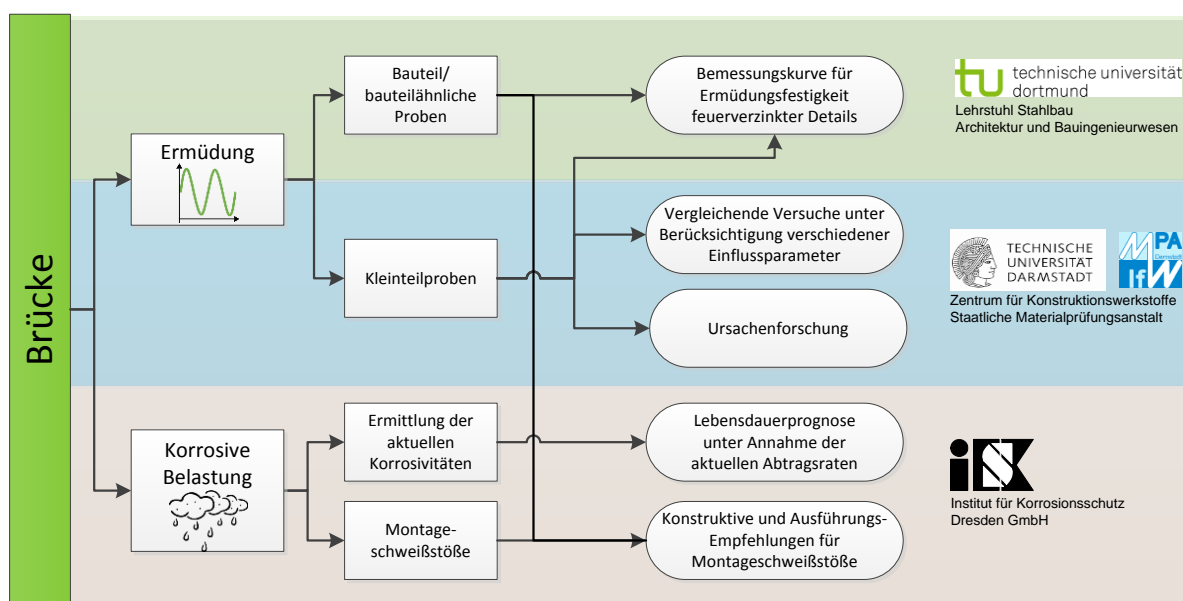


Abbildung 1.2: Schematische Aufteilung der experimentellen Untersuchungen

Figure 1.2: Schematic division of experimental studies

Schlussendlich werden alle Ergebnisse für den Planer und Konstrukteur in Handlungsempfehlungen zusammengefasst, Diese Empfehlungen ergänzen die bestehenden Regeln zum Feuerverzinken (z.B. Eckausbildungen, Durchflussöffnungen) -ohne ihnen zu widersprechen- und ermöglichen somit den Bau von feuerverzinkten Stahl und Verbundbrücken kurzer und mittlerer Spannweiten.

1.3 Aufbau dieses Berichts

1.3 Approach

Der vorliegende Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben “Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau” dokumentiert die durchgeführten Untersuchungen und die erzielten Ergebnisse des Projekts.

Der Bericht beginnt in Kapitel 2 mit einem Überblick über den derzeitigen Stand der Technik in den Bereichen der Ermüdung und der Feuerverzinkung und beschreibt in

den Kapiteln 3 und 4 die durchgeführten Ermüdungsversuche an feuerverzinkten Bauteilen sowie vergleichenden Untersuchungen an feuerverzinkten und unverzinkten Kleinteil-Proben. Im Kapitel 5 werden die Ursachen für Unterschiede bei den Ermüdungsfestigkeiten zwischen feuerverzinktem und unverzinktem Material aufgezeigt. Anschließend werden im Kapitel 6 Bemessungsregeln für feuerverzinkte Kerbdetails unter Berücksichtigung der maßgebenden Bemessungsnorm EN 1993-1-9 bereitgestellt. Ergebnisse zum Korrosionsverhalten des untersuchten Korrosionsschutzsystem Feuerverzinkung plus thermisch gespritzter Zinküberzug, Hinweise zur korrosionsschutzgerechten Konstruktion und die erarbeitete Ausbesserungstechnologie für die Ausführung von Arbeiten an Montageschweißstößen werden in den Kapiteln 7 und 8 vorgestellt. Schließlich werden die Ergebnisse im Schlusskapitel 9 zusammengefasst.

Der Anhang zum Forschungsvorhaben beinhaltet eine Zusammenstellung der im Rahmen der Versuchsdurchführung ermittelten Materialeigenschaften der verwendeten Probekörper sowie detailliertere Angaben zu den durchgeführten Ermüdungsversuchen.