

NE-Industriebau

Nachhaltige Erhaltung von bestehenden Industrieanlagen – Lebensdauererlängerung von zyklisch beanspruchten Stahlkonstruktionen im Industriebau



Prof. Dr.-Ing. André Dürr

M. Eng. Matthias Winkler



Hochschule München

Institut für Bau- und Materialforschung

Labor für Stahl- und Leichtmetallbau

Projektlaufzeit

01.04.2021 – 30.06.2024

Programm zur Förderung der angewandten Forschung und Entwicklung an Hochschulen für angewandte Wissenschaften, Programmsäule „Strukturimpuls Forschungseinstieg“

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Förderhinweis

Das Vorhaben „NE-Industriebau – Nachhaltige Erhaltung von bestehenden Industrieanlagen – Lebensdauererlängerung von zyklisch beanspruchten Stahlkonstruktionen im Industriebau“ wurde im Zuge der Programmsäule „Strukturimpuls Forschungseinstieg“ des Programms „Förderung der angewandten Forschung und Entwicklung an Hochschulen für angewandte Wissenschaften“ des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst gefördert.

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Zusammenfassung

Die Infrastruktur des Industriestandorts Deutschland ist einem steten Alterungsprozess unterworfen. Davon betroffen sind auch Stahltragwerke im Industriebau wie zum Beispiel Hallen, Leitungsbrücken, Schornsteine und Krane. Brückenkrane und deren Unterstützungsstrukturen sind aufgrund der zyklischen Belastung durch den Kranbetrieb besonders kritisch, da durch die langjährige Nutzung Ermüdungsschäden auftreten und die Integrität des gesamten Tragwerks beeinträchtigt werden kann. Deshalb wird für Kranbahnen in der aktuellen Bemessungsnorm Norm DIN EN 1993-6 [1] sowie in der Vorgängernorm DIN 4132 [2] ein Ermüdungs- bzw. Betriebsfestigkeitsnachweis gefordert. Die rechnerische Nutzungsdauer ab Inbetriebnahme liegt, sofern nichts anderes festgelegt wurde, gemäß DIN EN 1993-6/NA [3] bei 25 Jahren bzw. nach DIN 4132 [2] bei 50 Jahren. Nach Ablauf der Nutzungsdauer befindet sich die Kranbahn in einer normativ nicht mehr geregelten Phase. Der sichere Weiterbetrieb ist durch individuelle Nachweis- und Inspektionskonzepte sicherzustellen, da hierfür keine normativen Vorgaben existieren.

Da ein großer Teil der Industrieinfrastruktur im letzten Jahrhundert entstanden ist, befinden sich vermutlich 30% der Bestandskranbahnen am Ende ihrer rechnerischen Lebensdauer [4]. Durch die Materialermüdung kann es somit bei einer Vielzahl von Bauwerken zu Ermüdungsschäden kommen, welche bei Nichtentdecken zu einem unangekündigten Verlust der Tragfähigkeit und den damit verbundenen Folgen wie Sach- und Personenschäden führen kann.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden 3 zentrale Fragestellungen untersucht, wie ein sicherer ein sicherer Weiterbetrieb von Bestandskranbahnträgern ermöglicht werden kann:

1. Wie können vorgeschädigte, geschweißte Kerbdetails ertüchtigt bzw. verstärkt werden?
2. Wie können ermüdungsrissbehaftete, geschweißte Kerbdetails repariert und verstärkt werden?
3. Wie können sichere Inspektionsintervalle für den Weiterbetrieb festgelegt werden?

Hierfür wurde an kranbahntypischen Konstruktionsdetails ein umfangreiches Versuchsprogramm in Form von Ermüdungsversuchen an 103 Kleinprüfkörpern und 9 Großprüfkörpern bearbeitet. Für die Versuche wurden verschiedene Vorschädigungsgrade von Bestandsbauwerken simuliert und anschließend verschiedene Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen angewandt. Zu diesen Maßnahmen gehörten Schweißnahtnachbehandlungsverfahren wie Überschleifen, höherfrequentes Hämmern, Reparaturschweißungen und Querschnittsverstärkungen mittels Blechlamellen. Die Ergebnisse der umfangreichen Ermüdungsversuche dienten als Grundlage für die Entwicklung eines Konzepts zur Festlegung sicherer Betriebszeitintervalle unter Berücksichtigung ebendieser Verstärkungsmaßnahmen. Abschließend wurde ein Bewertungskonzept für Ingenieure, ausführende Stahlbauunternehmen und Betreiber von Kranbahnen, welches mit Hinweisen zu Inspektions- und Sanierungsarbeiten sowie zur rechnerischen Neubewertung enthält.

Mit den Ergebnissen des Forschungsprojekts konnte ein Beitrag zum sicheren Weiterbetrieb von Bestandskranbahnträgern und somit zur nachhaltigen Erhaltung bestehender Stahltragwerke im Industriebau erbracht werden.

Abstract

The infrastructure of the industry location Germany is subject to a permanent aging process. Industrial steel structures like warehouses, pipe and cable supports, chimneys and cranes are affected by this. Bridge cranes and their supports are particularly critical because fatigue cracks can occur due to long-time usage and impair the integrity of the whole supporting structure. Therefore a verification against fatigue failure according to DIN EN 1993-6 [1] or the preceding standard DIN 4132 [2] is required. The service life after putting into operation is regularly set at 25 years according to DIN EN 1993-6/NA [3] or 50 years according to DIN 4132 [2]. After the end of the service life the crane runway is in a normatively unregulated use phase. The safe continuation of use has to be ensured by individual verification and inspection concepts, since no norm specifications exist.

Since a large proportion of the industrial infrastructure was created in the last century, it is estimated that 30% of existing crane runways exceeded their calculated service life [4]. Due to fatigue damage cracks can occur that can lead to an abrupt failure of the load bearing structure, if they are not detected, resulting in property damage or personal injury.

In the course of the research project *NE-Industriebau* 3 main issues were addressed to enable a safe continued use of existing crane runway girders:

1. How can pre-damaged, welded structures be retrofitted or strengthened?
2. How can welded constructional details with fatigue cracks be repaired and strengthened?
3. How can safe inspection intervals be determined for a continued use?

Therefore, an extensive test program in form of fatigue tests on crane runway-typical constructional details (103 small specimens and 9 large specimens) was carried out. Different states of pre-damage of existing crane runways were simulated to test the effectiveness of different repair and strengthening methods. These methods consisted of post-weld treatments like grinding of high frequency mechanical impact treatment, repair welds and steel cover plates as local reinforcement. The results of the fatigue tests laid the foundation for the development of a concept for the determination of safe operation period in consideration of the investigated repair and strengthening methods. Finally, a design and manufacturing concept for engineers, executing companies and owners of crane runways was developed.

The research project thus could contribute to a safe continued use of existing crane runways and therefore to a sustainable conservation of industrial steel structures.

Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Wissenschaft

Maßnahme A: Projektbegleitender Arbeitskreis – PbA

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Die Forschungsergebnisse werden fortlaufend in Sitzungen des PbA ausführlich diskutiert	1. Sitzung PbA	08.04.2022
	2. Sitzung PbA	04.07.2023
	3. Sitzung PbA	21.06.2024

Maßnahme B: Publikation der Ergebnisse durch Veröffentlichungen in Zeitschriften

Ziel	Zeitschrift	Titel
Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Wissenschaft	Stahlbau – Sonderheft Kranbahnen 2021	Anwendung von höherfrequenten Hämmerverfahren bei Kranbahnträgern
	Stahlbau – Heft 4 2024	Ertüchtigungsmaßnahmen von Kranbahnen zur Lebensdauererlängerung

Maßnahme C: Vorstellung der Ergebnisse auf Tagungen und Konferenzen

Ziel	Konferenz	Titel
Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Wissenschaft	Münchener Kranbahntag 2022 (München)	Höherfrequente Hämmerverfahren zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit
	Fatigue Design 2023 (Senlis)	Life extension of pre-damaged existing crane runway girders
	Schweizer Kranbahntag 2023 (Zürich)	Kranbahnen und Kranhallen im Bestand - Bewertung, Schadensbilder, Weiterbetrieb
	Münchener Stahlbautage 2024 (München)	Ertüchtigungs- und Verstärkungsmaßnahmen zur Lebensdauererlängerung von ermüdungsbeanspruchten Bestandskonstruktionen
	DAST-Forschungskolloquium 2024 (München)	Lebensdauererlängerung von Bestandskranbahnträgern
	International Conference on Steel and Aluminum Structures 2024 (Rio de Janeiro)	Fatigue behaviour of pre-damaged welded steel components strengthened with steel cover plates

Maßnahme D: Präsentation des Projekts im Internet

Ziel	Konferenz	Datum
Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Wissenschaft	Homepage des Instituts für Bau- und Materialforschung der Hochschule München	Seit 2021

Maßnahme E: Schaffung der Grundlage einer Dissertation

Ziel	Thema	Promovend
Schaffung der Datengrundlage für eine angestrebte Promotion.	Lebensdauererlängerung bestehender Kranbahnträger	Matthias Winkler

Maßnahme F: Schaffung der Datengrundlage weiterer Forschungsprojekte

Ziel	Thema	Bewilligung
Schaffung der Datengrundlage für weitere Forschungsprojekte.	IGF-Projekt: „Bewertung bestehender Kranbahnen für den Weiterbetrieb zur Verbesserung der Ressourceneffizienz“	Zum 1.5.2024

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	7
II.	Abbildungsverzeichnis.....	10
III.	Tabellenverzeichnis.....	15
1	Einleitung.....	17
1.1	Forschungsanlass	17
1.2	Vorgehensweise	18
2	Stand der Normung und Forschung.....	20
2.1	Stand der Normung	20
2.2	Stand der Forschung	21
3	Bedarfsanalyse AP 1	25
4	Ermüdungsversuche AP 2-4.....	27
4.1	Referenzversuche AP 2	27
4.1.1	Übersicht und Prüfaufbau AP 2.....	27
4.1.2	Probekörperfertigung AP 2.....	30
4.1.3	Ergebnisse Ermüdungsversuche AP 2	33
4.2	Instandsetzung und Verstärkung von Bauteilen ohne sichtbaren Anriss AP 3.....	36
4.2.1	Versuchsübersicht und Prüfaufbau AP 3	36
4.2.2	Probekörperfertigung AP 3.....	37
4.2.3	Ergebnisse Ermüdungsversuche AP 3	40
4.2.4	Begleituntersuchungen AP 3.....	45
4.3	Reparaturschweißung mit Nachbehandlung AP 4.1	49
4.3.1	Versuchsübersicht AP 4.1.....	49
4.3.2	Probekörperfertigung AP 4.1.....	50
4.3.3	Ergebnisse Ermüdungsversuche AP 4.1	52
4.3.4	Begleituntersuchungen AP 4.1.....	57
4.4	Verstärkung mit Stahllamellen – Vorversuche AP 4.2	58
4.4.1	Versuchsübersicht AP 4.2.....	58
4.4.2	Probekörperfertigung AP 4.2.....	59
4.4.3	Ergebnisse Ermüdungsversuche AP 4.2	68

4.4.4	Begleituntersuchungen AP 4.2.....	71
4.5	Verstärkung mit Stahllamellen – Vorgeschiedigten Bauteile ohne Anriss AP 4.3	78
4.5.1	Versuchsübersicht AP 4.3.....	78
4.5.2	Probekörperfertigung AP 4.3.....	78
4.5.3	Ergebnisse Ermüdungsversuche AP 4.3	81
4.5.4	Begleituntersuchungen AP 4.3.....	83
4.6	Seitliches Knotenblech unter druckschwellender Beanspruchung.....	86
4.6.1	Versuchsübersicht	86
4.6.2	Versuchsergebnisse	87
4.7	Verstärkung mit Stahllamellen – Bauteile mit Anriss AP 4.4.....	89
4.7.1	Versuchsübersicht AP 4.4.....	89
4.7.2	Probekörperfertigung AP 4.4.....	90
4.7.3	Ergebnisse Rastlinienversuche AP 4.4	90
4.7.4	Kalibrierung des bruchmechanischen Modells AP 4.4.....	93
4.7.5	Bewertung der Auswirkung der Verstärkungsmaßnahmen auf das Risswachstum	94
5	Festlegung von Inspektionsintervallen AP 5.....	97
5.1	Hintergrund des Konzepts zur Festlegung der Inspektionsintervalle gem. DIN EN 1993-6/NA	97
5.2	Vorschlag für den Umgang mit Bestandskranbahnen am Ende der geplanten Nutzungsdauer unter der Berücksichtigung von Ertüchtigungen/Verstärkungen	99
5.2.1	Ausgangssituation	99
5.2.2	Empfehlung zur Festlegung von Inspektionsintervallen unter der Berücksichtigung von Ertüchtigungen/Verstärkungen.....	99
5.3	Beispielrechnung für die bruchmechanische Bewertung einer Bestandskranbahn mit lokaler Verstärkung.....	102
5.3.1	Krandaten und statisches System.....	102
5.3.2	Einwirkungsseite E_d	103
5.3.3	Widerstandsseite R_d	107
5.3.4	Ergebnis.....	108
6	Empfehlungen zur Bewertung von Bestandskranbahnträgern	110
6.1	Bestandsaufnahme:.....	110
6.2	Rechnerische Neubewertung	112

6.3	Inspektion kritischer Stellen	112
6.4	Durchführung von Instandsetzungs- oder Verstärkungsmaßnahmen	113
7	Ausblick	115
8	Literaturverzeichnis	116
	Anhang A – Protokolle Experteninterviews	121
	Anhang B – Ergebnisse Laservermessung	122
	Anhang C – Protokolle Arbeitskreissitzung	123
	Anhang D – Protokolle Querschnittsberechnung	124
	Anhang E – Protokolle Rissfortschrittsberechnung	125

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Brückenkran auf Kranbahnträger [5].....	17
Abbildung 1-2: Übersicht Arbeitspakete.....	19
Abbildung 2-1: Links) Schlagbolzen eines HFH-Geräts, rechts) HFH-nachbehandelter Nahtübergang einer aufgeschweißten Schienenklemme	22
Abbildung 2-2: Anwendungsempfehlungen für das Überschleifen bzw. Ausfräsen des Nahtübergangs gem. [10]	23
Abbildung 2-3: Untersuchte Reparaturmethoden in [32] - a) Stop-Hole-Bohrung, b) Stop-Hole-Bohrung mit HV-Schraube, c) Stop-Hole-Bohrung mit angeschraubter Lamelle (HV-Schrauben)	24
Abbildung 3-1: Kritische Kerbdetails von Kranbahnen [12]	25
Abbildung 3-2: Typische Schäden an Kranbahnträgern [44]	26
Abbildung 3-3: Risse an einem Kranbahnaufleger [46]	26
Abbildung 4-1: Kleinprüfkörper der untersuchten Konstruktionsdetails – a) Knotenblech, b) Quersteife, c) Schienenklemme.....	28
Abbildung 4-2: Links) Prüfmaschine SincoTec Power Swing 600, rechts) eingebauter SK-Probekörper	28
Abbildung 4-3: Schematischer Prüfaufbau - Trägerversuche	29
Abbildung 4-4: Trägerversuche – Schenck-Resonanzpulsator	29
Abbildung 4-5: Abmessungen – KB-A.....	30
Abbildung 4-6: Abmessungen – QS-A	30
Abbildung 4-7: Abmessungen – SK-A.....	30
Abbildung 4-8: Abmessungen – T-QS-A.....	31
Abbildung 4-9: Simulation der behinderten Umschweißung durch das Stegblech	31
Abbildung 4-10: Links) unbehinderte Umschweißung, rechts) behinderte Umschweißung	32
Abbildung 4-11: Links) schematische Darstellung des Verzugs der QS-Probekörper, rechts) Richten der QS-Probekörper mittels hydraulischen Stempels.....	32
Abbildung 4-12: Probekörper im as-welded Zustand - a) SK-Probekörper, b) KB-Probekörper, c) T-QS-Prüfkörper	33
Abbildung 4-13: Versagensbilder Serie A – a) Knotenblech, b) Quersteife, c) Schienenklemme, d) Träger mit Quersteife	34
Abbildung 4-14: Wöhlerdiagramm – links) Serie KB-A, rechts) QS-A & T-QS-A.....	34
Abbildung 4-15: Wöhlerdiagramm – SK-A	35
Abbildung 4-16: Untersuchte Nahtnachbehandlungsverfahren – von links nach rechts) HFH, Überschleifen per Winkelschleifer, Ausfräsen per Frässtift.....	36
Abbildung 4-17: Versuchsablauf AP3 – 1) Vorschädigung im Resonanzpulsator, 2) Feststellen der	

Rissfreiheit mittels PT-Verfahren, 3) Schweißnachnachbehandlung, 4) Ermüdungsversuch bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums	36
Abbildung 4-18: KB-B-Prüfkörper - links) nur am NÜ behandelt, rechts) komplette Nahtoberfläche + 10 mm WEZ behandelt	37
Abbildung 4-19: QS-B-Prüfkörper: links) behinderte Nachbehandlung durch Stegblech, rechts) unvollständige Hammerspur im Cut-Out-Bereich	38
Abbildung 4-20: SK-B-Prüfkörper.....	38
Abbildung 4-21: Überschliffener NÜ - links) SK-F, rechts) KB-F	39
Abbildung 4-22: Fertigung QS-F – links) Behinderung durch Stegblech, rechts) Frässpur und Geradeschleifer.....	40
Abbildung 4-23: Versagensbilder Serie KB-B – links) Rissausgang bei einfacher Hammerspur (PK 1- 2), rechts) Rissausgang bei großflächiger HFH-Nachbehandlung und PK 3	40
Abbildung 4-24: Versagensbilder Serie QS-B.....	41
Abbildung 4-25: Versagensbilder Serie SB-B – links) Rissausgang in der Schienenklemmenmitte, rechts) Rissausgang in der Hammerspur	41
Abbildung 4-26: Wöhlerdiagramm – links) Serie KB-A, B, C & F, rechts) Serie QS-A, B, C & F	44
Abbildung 4-27: Wöhlerdiagramm – Serie SK-A, B, C & F	44
Abbildung 4-28: Schematische Darstellung der Laservermessung	46
Abbildung 4-29: Vermessung einer überschliffenen Schienenklemme	46
Abbildung 4-30: Schematische Darstellung der vermessenen Kerbgeometrieparameter	47
Abbildung 4-31: a) 3D-Gesamtmodell eines Probekörpers mit aufgeschweißter Schienenklemme, b) Schnitt durch ein Submodell eines Nahtübergangs im as-welded Zustand, c) Schnitt durch ein Submodell eines nachbehandelten Nahtübergangs.....	48
Abbildung 4-32: Nicht fachgerechte Reparaturschweißung – a) Schienenklemme mit Ermüdungsris, b) unvollständiges Ausschleifen des Risses, c) Reparaturaht mit verbleibender Risspitze.....	49
Abbildung 4-33: Links) KB-Prüfkörper mit Seitenriss, rechts) ausgeschliffener Seitenriss	51
Abbildung 4-34: Links) Reparaturaht, rechts) überschliffene Reparaturaht.....	51
Abbildung 4-35: Serie KB-E - Großflächig gehämmerte Reparaturaht – Probekörper 4-6.....	51
Abbildung 4-36: Serie SK-E – links) PT-Prüfung zur Kenntlichmachung der oberflächlichen Risslänge, rechts) ausgeschliffener Riss mit verbleibender Risspitze	52
Abbildung 4-37: Serie SK-E – links) reparaturgeschweißte Naht, rechts) gehämmerte Reparaturaht	52
Abbildung 4-38: Versagensbilder Serie KB-D – links) KB-D-1, rechts) KB-D-3.....	52
Abbildung 4-39: Versagensbild SK-D-1	53
Abbildung 4-40: Versagensbilder Serie KB-E – links) PK 1-3 (einfache Hammerspur), rechts) PK 4-6 (großflächig HFH-nachbehandelt)	54
Abbildung 4-41: Versagensbilder Serie SK-E	54

Abbildung 4-42: Wöhlerdiagramme – links) Serie KB-A/B/D/E, rechts) Serie SK-A/B/D/E	56
Abbildung 4-43: SK-D-1 – links) Ansicht, rechts) Übersichtsbild des Makroschliffs.....	57
Abbildung 4-44: Makroschliff des PK SK-D-1 (20-fache Vergrößerung) – Links) Reparaturaht, rechts) as-welded Naht.....	57
Abbildung 4-45: Typische Verbinder für Verstärkungslamellen – links) aufgeschweißte Lamelle, rechts) angeschraubte Lamelle	58
Abbildung 4-46: Übersicht Probekörper – AP 4.2 – a) geschweißt, b) Passschraube/HV-Schraube M12, c) Passschraube M20, d) gewindefurchende Schraube, e) Schließringbolzen M12, f) 2-K-Epoxidharz.....	59
Abbildung 4-47: Abmessungen – KB-Lam-aw	60
Abbildung 4-48: Schematische Darstellung - KB-Lam-HFH	60
Abbildung 4-49: Gehämmerte Stirnnaht – KB-Lam-HFH	60
Abbildung 4-50: Abmessungen – KB-PassM12.....	61
Abbildung 4-51: Überschliffene Kontaktfläche	61
Abbildung 4-52: Abmessungen – KB-PassM20.....	62
Abbildung 4-53: Abmessungen – KB-HVM12.....	62
Abbildung 4-54: Links) Oberflächenvorbereitung mittels Bristle-Blaster, rechts) aufgeraute Oberfläche	63
Abbildung 4-55: Gewindefurchende Schraube - nonut TDBL-T-13,4x33 [61].....	64
Abbildung 4-56: Klaffender Spalt durch Montage ohne Feststellzange	64
Abbildung 4-57: Abmessungen – KB-SFS.....	65
Abbildung 4-58: Schließringbolzen mit und ohne Sollbruchstelle [64].....	65
Abbildung 4-59: Montagevorgang mit Schließringbolzen [69]	66
Abbildung 4-60: Abmessungen – KB-SRB	66
Abbildung 4-61: Installation der Schließringbolzen.....	67
Abbildung 4-62: Abmessungen – KB-2K.....	67
Abbildung 4-63: Links) gestrahlte Oberfläche, rechts) aufgetragener Klebstoff auf Probekörper	68
Abbildung 4-64: Versagensbilder AP 4.2 – links) $N\ddot{U}$ – Riss am Nahtübergang, rechts) Netto – Riss im Nettoquerschnitt.....	69
Abbildung 4-65: Versagensbild Serie KB-Lam-aw/HFH – Lam - Riss der Stirnnaht	70
Abbildung 4-66: Normierte Lebensdauererlängerung Λ – AP 4.2.....	71
Abbildung 4-67: Messung der Rautiefe.....	71
Abbildung 4-68: Position der Dehnmessstreifen an KB-Probekörpern mit Lamellenverstärkung	72
Abbildung 4-69: Auswertung der statischen Dehnungsmessungen – AP 4.2	72
Abbildung 4-70: Auswertung zyklischer Dehnungsmessungen – links) KB-PassM12-1, rechts) KB-PassM20-1	73
Abbildung 4-71: Auswertung zyklischer Dehnungsmessungen – KB-SFS-4.....	73

Abbildung 4-72: Statisches System – FE-Modell eines Prüfkörpers aus AP 4.2.....	74
Abbildung 4-73: Pfad für Spannungsauswertung	74
Abbildung 4-74: FE-Volumenmodelle – links) KB-PassM12/KB-SFS, rechts) KB-SRB	75
Abbildung 4-75: Ergebnisse der experimentellen und numerischen Spannungsmessungen mit FehlerTabelle – AP 4.2	75
Abbildung 4-76: Praktikabilitätsindex Π - AP 4.2	77
Abbildung 4-77: Probekörper KB-D=1-SFS-3 - PT-Prüfung nach Vorschädigung	79
Abbildung 4-78: Abmessungen Probekörper – T-QS-D=1-SRB.....	80
Abbildung 4-79: Abmessungen Probekörper – T-QS-D=1-SFS	80
Abbildung 4-80: Probekörper KB-D=1-SFS-3 nach Erreichen des Abbruchkriteriums und Entfernen der Verstärkungslamelle	81
Abbildung 4-81: Riss im Nettoquerschnitt – links) T-QS-D=1-SFS-3, rechts) T-QS-D=1-SRB-1	82
Abbildung 4-82: Wöhlerdiagramme – links) Serie KB-D=1, rechts) Serie T-QS-D=1	82
Abbildung 4-84: Positionen DMS – T-QS (bei T-QS-A: nur DMS 3, DMS 1&2 nur bei -SRB).....	84
Abbildung 4-85: Statisches System – Dehnungsmessungen	84
Abbildung 4-86: Einfluss der Lamellenlänge auf die Spannung der Unterflanschoberkante.....	85
Abbildung 4-87: Verformung des Unterflansches mit Lamelle $l = 100$ mm (100-fach überhöht).....	86
Abbildung 4-88: Verformung des Unterflansches mit Lamelle $l = 450$ mm (100-fach überhöht).....	86
Abbildung 4-89: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an Walzprofilen mit aufgeschweißten Schienenklemmen mit eigener Auswertung [75]	87
Abbildung 4-90: Risse am Nahtübergang der Knotenbleche unter Druckschwellbeanspruchung	88
Abbildung 4-91: Wöhlerdiagramm – KB-Druck	88
Abbildung 4-92: Versuchsablauf AP 4.4	89
Abbildung 4-93: Lastblöcke des Rastlinienverfahrens, *bei KB-Riss-SRB/SFS	90
Abbildung 4-94: Prüfkörper KB-Riss – a) Prüfkörper nach Vorschädigung, b) Bruchfläche mit Rastlinien	91
Abbildung 4-95: Prüfkörper KB-Riss-SFS – a) Prüfkörper mit plastisch verformten Schrauben nach Bauteilbruch, b) Bruchfläche mit Rastlinien.....	92
Abbildung 4-96: Prüfkörper KB-Riss-SRB – a) nach Vorschädigung ($a = 24$ mm), b) nach 1.000.000 Schädigungslastwechseln ($a = 24$ mm).....	92
Abbildung 4-97: KB-Riss - Gegenüberstellung des experimentellen und berechneten Rissfortschritts	94
Abbildung 4-98: Vergleich der experimentellen Rissfortschrittskurven.....	95
Abbildung 4-99: KB-Riss-SFS - Gegenüberstellung des experimentellen und berechneten Rissfortschritts	96
Abbildung 5-1: Ablaufschema zur Bewertung eines ungerissenen Kerbdetails eines Kranbahnträgers	101
Abbildung 5-2: Statisches System und Kerbdetail mit Anfangsriß	103

Abbildung 5-3: Formeln zur Ermittlung des SIF eines randnahen halbelliptischen Oberflächenrisses [16]	106
Abbildung 5-4: Formeln zur Strukturspannungseinflusses einer unbelasteten Quersteife [16].....	106
Abbildung 5-5: Ergebnisse der Rissfortschrittsberechnung – Unbelastete Quersteife in Feldmitte .	108
Abbildung 6-1: Mangelhafte Steg-Flansch Kehlnaht eines Kranbahnträgers [4].....	111

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Erforderliche Anzahl der Inspektionsintervalle gem. [3]	20
Tabelle 2-2:	Vergleich der Bemessungsermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_C$ für kranbahntypische Kerbdetails (S355, R = 0,1) in N/mm ² [18].....	22
Tabelle 2-3:	Erreichbare Lebensdauer durch UIT-Nachbehandlung bei verschiedenen Vorschädigungsgraden [27].....	23
Tabelle 3-1:	Schadensfälle an Kranbahnträgern	25
Tabelle 4-1:	Übersicht Ermüdungsversuche – Alle APs	27
Tabelle 4-2:	Übersicht Prüfserien - AP 2	27
Tabelle 4-3:	Mittelwerte Prüffrequenz und Risslänge – Serie A	28
Tabelle 4-4:	Schweißparameter – Serie A	31
Tabelle 4-5:	Ergebnisse Ermüdungsversuche – AP2	35
Tabelle 4-6:	Übersicht Prüfserien - AP 3	37
Tabelle 4-7:	Übersicht – Details HFH-Geräte	38
Tabelle 4-8:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche – Serie B	41
Tabelle 4-9:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche – Serie C	42
Tabelle 4-10:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche – Serie F	43
Tabelle 4-11:	Zusammenfassung Ermüdungsversuche – AP 3	43
Tabelle 4-12:	Mittelwert gemessener Bearbeitungsgeschwindigkeiten.....	45
Tabelle 4-13:	Ergebnisse Laservermessung - Mittelwerte	46
Tabelle 4-14:	Konvergenzanalyse – Netzfeinheit am NÜ am Submodell der Schienenklemme (as-welded)	48
Tabelle 4-15:	Ergebnisse – Kerbformzahlen	49
Tabelle 4-16:	Übersicht Prüfserien - AP 4.1	50
Tabelle 4-17:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche – Serie D	53
Tabelle 4-18:	Ergebnisse der Ermüdungsversuche – Serie E.....	55
Tabelle 4-19:	Zusammenfassung der Ermüdungsversuche – AP 4.1	56
Tabelle 4-20:	Übersicht Prüfserien – AP 4.2	59
Tabelle 4-21:	Ergebnisse Ermüdungsversuche – AP 4.2	70
Tabelle 4-22:	Praktikabilitätsmatrix – AP 4.2	76
Tabelle 4-23:	Übersicht Prüfserien – AP 4.3	78
Tabelle 4-24:	Ergebnisse Ermüdungsversuche – AP 4.3	82
Tabelle 4-25:	Analytische Querschnittswerte – HEB 140 mit Verstärkungslamelle	84
Tabelle 4-26:	Ergebnisse DMS-Messungen – AP 4.4	84
Tabelle 4-27:	Versuchsergebnisse – KB-Druck.....	88
Tabelle 4-28:	Übersicht Prüfserien – AP 4.4	90

Tabelle 4-29:	Ergebnisse des Rissfortschrittsversuchs KB-Riss und der Rissfortschrittsberechnung.	94
Tabelle 4-30:	Ergebnisse des Rissfortschrittsversuchs KB-Riss-SFS und der Rissfortschrittsberechnung	95
Tabelle 5-1:	Beispielrechnung - Daten Kranbrücke	102
Tabelle 5-2:	Beispielrechnung – Daten Kranbahn.....	102
Tabelle 5-3:	Lastkollektiv für die gesamte geplante Lebensdauer (25 Jahre).....	104
Tabelle 5-4:	Lastkollektiv für einen Berechnungsschritt (vierteljährlich).....	105

1 Einleitung

1.1 Forschungsanlass

In vielen Industrie-, Handels-, und Handwerksbetrieben werden Güter mittels flurfreier Krane bewegt. Hierfür kommen meist Brückenkrane zum Einsatz, welche auf Kranbahnen verfahren werden, siehe Abbildung 1-1. Diese sind in den meisten Fällen auf Konsolen gelagert, welche mit der Hallenkonstruktion verbunden sind. Durch das Verfahren der Kranbrücke und den Hubvorgängen der Laufkatze erfährt die Kranbahn, die Konsolen und die Hallenstützen eine zyklische Beanspruchung, was durch die Materialermüdung zu einer abnehmenden Beanspruchbarkeit des Bauteils führt. Deshalb ist gemäß DIN EN 1993-6 [1] neben den Nachweisen gegen die Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) und Gebrauchstauglichkeit (GZG) auch ein Ermüdungsnachweises der Kranbahn und der unterstützenden Konstruktion gefordert. Die Nutzungsdauer ist, sofern nichts anderes festgelegt wurde, gemäß DIN EN 1993-6/NA [3] mit 25 Jahren anzusetzen. Nach Ablauf der Nutzungsdauer befindet sich die Kranbahn in einer normativ nicht mehr geregelten Phase. Der sichere Weiterbetrieb ist durch individuelle Nachweis- und Inspektionskonzepte sicherzustellen, da hierfür keine normativen Vorgaben existieren. Da ein großer Teil der Industrieinfrastruktur im letzten Jahrhundert entstanden ist, befinden sich vermutlich 30% der Bestandskranbahnen am Ende ihrer rechnerischen Lebensdauer [4]. Für Ingenieure, ausführende Stahlbauunternehmen und Betreiber von Kranbahnen besteht somit der Bedarf an einem Bewertungs- und Bemessungskonzept mit Ausführungsempfehlungen, um einen sicheren Weiterbetrieb von Bestandskranbahnträgern und somit die nachhaltige Erhaltung bestehender Stahltragwerke im Industriebau zu ermöglichen.

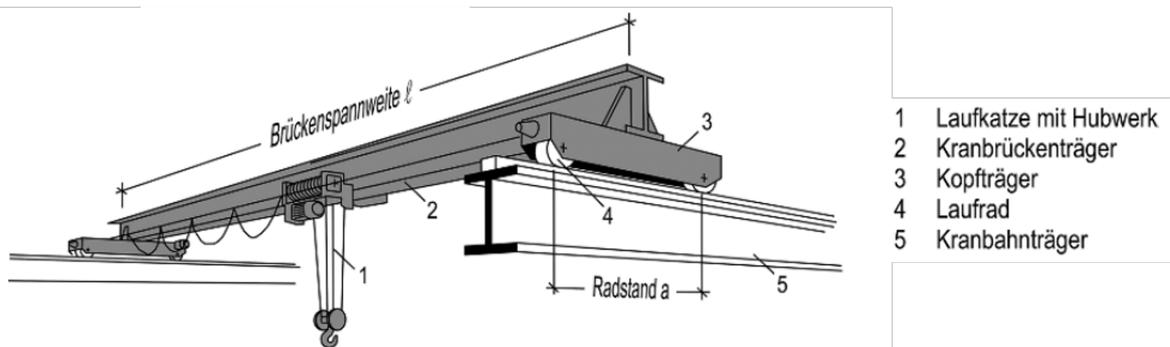


Abbildung 1-1: Brückenkrane auf Kranbahnträgern [5]

1.2 Vorgehensweise

Um die Forschungsziele zu erreichen, wurden folgende 7 Arbeitspakete bearbeitet.

- Arbeitspaket (AP) 1 beschäftigte sich mit der Bedarfsanalyse. Durch Literaturrecherche und Interviews mit Ingenieuren, siehe Anhang A für die Gesprächsprotokolle, die sich mit Bestandskranbahnen beschäftigten, oder Betreibern von Kranbahnen wurden Konstruktionsdetails festgelegt, welche die Grundlage der anschließend durchgeführten Untersuchungen bilden.
- Im AP 2 wurden Referenzwöhlerlinien der im AP 1 festgelegten Konstruktionsdetails bestimmt. Hierfür wurden Ermüdungsversuche an geschweißten Proben im as-welded Zustand durchgeführt.
- Im AP 3 wurden verschiedene Instandsetzungsmaßnahmen an vorgeschädigten Bauteilen ohne Anriss untersucht. Dafür wurden die Konstruktionsdetails aus AP 1 zyklisch vorgeschädigt, mit Schweißnahtnachbehandlungsverfahren, die bei Neubauten angewandt werden, behandelt und anschließend bis zum Versagenkriterium geprüft. Die Lastspielzahl der Vorschädigung wurde aus den Ergebnissen des AP 2 abgeleitet.
- Im AP 4 wurden verschiedene Verstärkungsmaßnahmen für gerissene Bauteile untersucht. Aufgrund der großen Probekörperanzahl wurde AP 4 in vier Unterarbeitspakete aufgeteilt. AP 4.1 beschäftigte sich mit Reparaturschweißungen und anschließender Nachbehandlung. Dafür wurden verschiedene Reparaturschweißprozeduren an gerissenen Proben aus AP 2 mit anschließender HFH-Nachbehandlung (Hochfrequente Hämmerverfahren) untersucht. In AP 4.2 bis AP 4.4 wurde die Verstärkung von Bestandskranbahnträgern mit Stahllamellen untersucht. Mit Vorversuchen wurde im AP 4.2 die Eignung verschiedener Befestigungsmethoden an as-welded Probekörpern bestimmt. Anschließend wurden im AP 4.3 zwei bevorzugte Befestigungsmethoden auf vorgeschädigte Probekörper analog zu AP 3 angewandt. Um den Einfluss der Lamellenverstärkungen auf das Risswachstum zu quantifizieren, wurden in AP 4.4 an ausgewählten Kerbdetails Rissfortschrittsmessungen an vorgeschädigten Probekörpern, welche mit den Methoden aus AP 4.3 verstärkt wurden, durchgeführt.
- Im AP 5 wurden auf Basis der Ergebnisse des AP 4.4 theoretische Untersuchungen für die Festlegung von Inspektionsintervallen durchgeführt. Dabei wurde mittels bruchmechanischer Untersuchungen ein Konzept zur Festlegung von sicheren Betriebszeitintervallen für rissbehaftete Bauteile mit Lamellenverstärkungen abgeleitet.
- Die Erkenntnisse der AP 1-5 wurden abschließend im AP 6 in Form einer Bewertungskonzepts mit Empfehlungen zur Bemessung, Inspektion, bruchmechanischen Festlegung von Inspektionsintervallen und Ausführung von Sanierungen sowie Ertüchtigungen zusammengefasst.
- AP 7 widmete sich während der gesamten Projektlaufzeit dem Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Form von Publikationen in Zeitschriften und Präsentationen auf Konferenzen. Zusätzlich wurde ein Arbeitskreis aus Industrievertretern, Ingenieuren und Betreibern von Kranbahnen konstituiert, siehe Anhang C für die Sitzungsprotokolle. Während der Projektlaufzeit fanden jährliche Sitzungen statt, um die Ergebnisse des Forschungsprojekts zu präsentieren und zu diskutieren.

Eine Übersicht über die Arbeitspakete ist in Abbildung 1-2 gegeben.

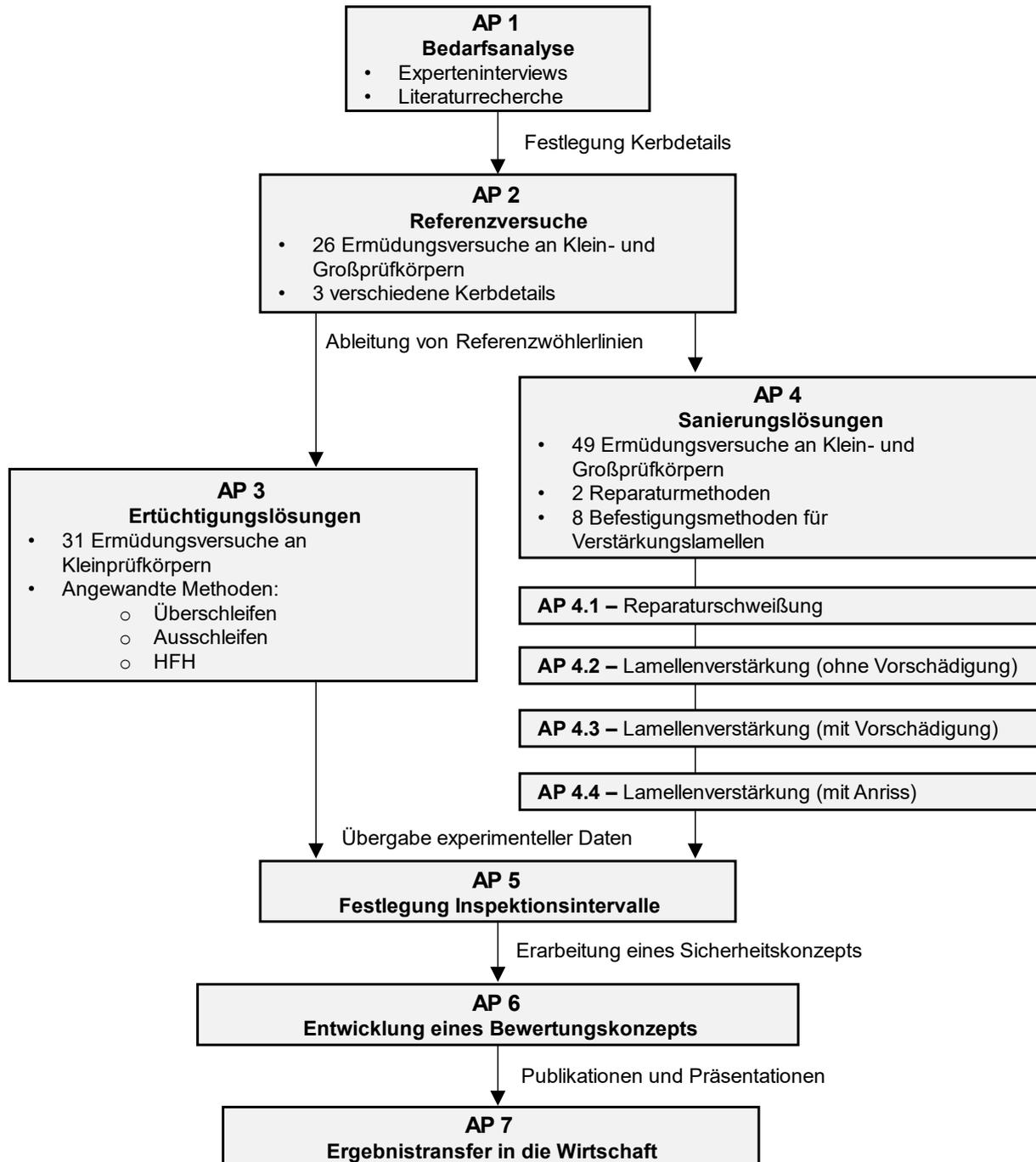


Abbildung 1-2: Übersicht Arbeitspakete

2 Stand der Normung und Forschung

2.1 Stand der Normung

Neubauten von Kranbahnen werden seit der bauaufsichtlichen Einführung der Normen DIN EN 1993-6 [1] und DIN EN 1993-6/NA [3] im Jahr 2012 nach ebendiesen Normen geplant, welche den Stand der Technik kodifizieren. Kranbahnen, die vor 2013 und nach 1980 errichtet wurden, wurden i. d. R. nach DIN 4132 [2] geplant. Diese Norm wird als sichere Altnorm eingestuft [4] und nach dieser Norm bemessene Kranbahnen können somit weiterbetrieben werden, wenn sichergestellt ist, dass die rechnerische Lebensdauer noch nicht erreicht wurde. Kranbahnen, die vor 1980 errichtet und nach DIN 120 [6] oder TGL 13 471 [7] (DDR) bemessen wurden, welche nicht dem Stand der Technik entsprechen und somit als unsichere Altnormen gelten, fallen nicht mehr unter den Bestandschutz, da hier das Grundrecht auf körperliche Unversehrtheit gem. Art. 2 Abs. 2 GG gefährdet wird. Diese Kranbahnen müssen grundsätzlich nach aktuellen Normen neu bewertet werden. Auch bei relevanten Nutzungs- oder Laständerungen ist grundsätzlich eine Neubemessung erforderlich.

1936 - 1980	DIN 120	(DDR: ab 1969 TGL 13471) – <i>unsichere Altnorm</i>
1981 - 2012	DIN 4132	<i>sichere Altnorm</i>
2012 - heute	DIN EN 1993-6	

Während des Betriebs schreibt DIN EN 1993-6/NA [3] vom in der Ermüdungsbemessung angesetzten Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} abhängige Inspektionsintervalle vor, vgl. Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Erforderliche Anzahl der Inspektionsintervalle gem. [3]

Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf}	Anzahl der Inspektionsintervalle
1,00	4
1,15	3
1,35	2
1,60	1

Die Inspektionen sind während der Nutzungsdauer durchzuführen. Die Nutzungsdauer wird, sofern nichts anderes festgelegt wurde, gem. [3] mit 25 Jahren angenommen. Zur zeitlichen Verteilung und Art der Inspektionen wird in den einschlägigen Normen keine Empfehlung ausgesprochen. Das Hintergrunddokument geht allerdings von gleichlangen Inspektionsintervallen aus [8]. Nach Ablauf der Nutzungsdauer befindet sich die Kranbahn in einer normativ nicht geregelten Phase.

Als Orientierung für die weiterführende Nutzung kann die Überwachungs- und Prüfnorm für Ingenieurbauwerke DIN 1076 [9] herangezogen werden. Danach sind Ingenieurbauwerke nach Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung alle 6 Jahre einer Hauptprüfung zu unterziehen. Die amerikanische Federal Highway Administration schreibt einen zweijährigen Prüfturnus vor [10].

Für die Durchführung der Inspektionen kann sich an der VDI-Richtlinie 6200 [11] und der BFS-Richtlinie 07-104 [12] orientiert werden.

Für die Durchführung von Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an Bestandskranbahnen existiert keine Empfehlung. Für bestehende Stahlbrücken gibt es das DVS Merkblatt 1709 [13].

Die folgenden Definitionen sollen die verschiedenen Maßnahmen, die an Bestandstragwerken vorgenommen werden können, gegeneinander abgrenzen und sind der DVS-Richtlinie 1709 [13] entnommen.

- **Instandsetzung** | Instandsetzungsmaßnahmen haben das Ziel, die Tragfähigkeit und die Dauerhaftigkeit von beschädigten Bauteilen und deren Verbindungen wiederherzustellen.
- **Ertüchtigung** | Ertüchtigungsmaßnahmen haben das Ziel, eine Tragfähigkeitserhöhung zu erreichen.
- **Verstärkungsmaßnahmen** | Verstärkungsmaßnahmen haben das Ziel, eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit herzustellen.

Dauerhaftigkeit bezeichnet gemäß DIN EN 15643 [14] die Fähigkeit eines Bauwerks, die geforderte technische Qualität über die Nutzungsdauer aufrechtzuerhalten. Unter den geforderten Qualitäten ist neben dem Widerstand gegen z.B. Korrosion oder Frost-Tau-Wechsel auch der Widerstand gegen Ermüdung benannt.

2.2 Stand der Forschung

In dem Forschungsprojekt werden für die Lebensdauererlängerung von Bestandsbauten neben den Ertüchtigungsmaßnahmen Höherfrequentes Hämmern, Ausfräsen und Übersleifen des Nahtübergangs auch Reparaturschweißungen und lokale Querschnittsverstärkungen mittels Blechlamellen untersucht. In diesem Kapitel wird der wissenschaftliche Erkenntnisstand über die Anwendung der Verfahren bei vorgeschädigten Konstruktionen kurz zusammengefasst.

Höherfrequentes Hämmern

Das Höherfrequente Hämmerverfahren (HFH) ist ein Schweißnahtnachbehandlungsverfahren, bei welchem ein Schlagbolzen aus Hartmetall den Schweißnahtübergang in hoher Frequenz lokal plastisch verformt, siehe Abbildung 2-1. Die plastische Verformung hat 3 positive Effekte auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißverbindung. Durch Vergrößerung des Kerbradius am Nahtübergang wird die Kerbzahl reduziert. Zudem wird durch die Kaltverfestigung die Oberflächenhärte lokal erhöht. Zusätzlich werden durch die elastischen Rückstellkräfte des benachbarten, nicht plastisch verformten Materials Druckeigenspannungen in den Bereich des ermüdungskritischen Schweißnahtübergangs eingebracht. Durch diese Effekte können in Abhängigkeit von der Materialfließgrenze und des Mittelspannungsniveaus hohe Steigerungen der Ermüdungsfestigkeit erreicht werden. Das Verfahren ist nur auf Kerbdetails, bei denen der Rissausgang am Nahtübergang erwartet wird, anwendbar. Für die Anwendung bei Neubauten existiert die bauaufsichtlich zugelassene DAST-Richtlinie 026 [15] sowie die IIW-Richtlinien [16] und [17]. Zugelassen sind gemäß den genannten Richtlinien die Verfahren UIT, HiFIT und PIT. Beispiele für die Anwendung bei kranbahntypischen Kerbdetails sind in [18] enthalten, siehe Tabelle 2-2.

Tabelle 2-2: Vergleich der Bemessungsermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_c$ für kranbahntypische Kerbdetails (S355, R = 0,1) in N/mm² [18]

Kerbdetail	DIN EN 1993-1-9 [19]	prEN 1993-1-9:2021	DAST-Richtlinie 026 [15]	IIW Hobbacher [16]	IIW Marquis [17]
1 - Quersteife	80	80	140	120	140
2 - Längssteife	56 - 80	63 - 80	112	84 - 120	100 - 140
3 - Knotenblech	40	56	k. A.	60	63
4 - Schienenklemme	k. A.	50 - 80	k. A.	84 - 120	100 - 140
5 - Flansch-Steg-Verbindung mittels K-Naht	100 - 125	100 - 125	k. A.	125	160
5 - Flansch-Steg-Verbindung mittels Kehlnaht	100 - 125	100 - 125	WR ¹⁾	WR ¹⁾	WR ¹⁾
6 - Schienenschweißnaht	k. A.	56	WR ¹⁾	WR ¹⁾	WR ¹⁾

¹⁾Wurzelrissgefahr

Für die Anwendung bei Bestandskonstruktionen existiert bisher keine Bemessungsnorm. Forschungsergebnisse zeigen allerdings, dass das Verfahren auch bei vorgeschädigten Konstruktionen ohne Anrisse oder nur mit kleinen Anrissen angewandt werden kann. In [17], [18], [19], [20] und [21] wurden Ermüdungsversuche an den Kerbdetails Stumpfstoß, Längs- und Quersteife durchgeführt. Hierfür wurden die Probekörper auf die Schädigungssumme $D = 1,0$ bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit $P_0 = 95\%$ vorgeschädigt und anschließend HFH-nachbehandelt. Bei der Nachbehandlung lagen keine technischen Anrisse vor. Im Schnitt konnte eine Lebensdauer von $D = 21,7 \left(\frac{\text{Gesamtlastwechsel}}{\text{Vorschädigungslastwechsel}} \right)$ erreicht werden. In [20], [25], [26] wurden Probekörper mit den Kerbdetails Längs- und Quersteife bis zu Risstiefen von 1,3 mm vorgeschädigt und HFH-nachbehandelt. Die im anschließenden Ermüdungsversuch erreichten Lebensdauern lagen bei $D = 1,0 - 4,0$. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Effektivität bei Schweißnähten mit Anriss, ist eine Anwendung des HFH-Verfahrens ohne vorherige Reparatur nicht empfehlenswert. Zhang [27] entdeckte an Stumpfstoßproben einen Zusammenhang zwischen dem Vorschädigungsgrad und der nach der HFH-Nachbehandlung erreichbaren Lebensdauer, vgl. Tabelle 2-3.



Abbildung 2-1: Links) Schlagbolzen eines HFH-Geräts, rechts) HFH-nachbehandelter Nahtübergang einer aufgeschweißten Schienenklemme

Tabelle 2-3: Erreichbare Lebensdauer durch UIT-Nachbehandlung bei verschiedenen Vorschädigungsgraden [27]

$D_{\text{Vorschädigung}} = \frac{\text{Vorschädigungslastwechsel}}{N_{50\%,aw^1}}$ [-]	$D_{\text{treat}} = \frac{\text{Gesamtlastwechsel}}{N_{50\%,aw^1}}$ [-]
0,00	15,9
0,25	11,8
0,50	4,3
0,75	3,6
1,00	3,7

¹⁾Lastwechselzahl für die Schädigungssumme D = 1 bei $P_U = 50\%$ einer unbehandelten Probe im as-welded Zustand

Überschleifen und Ausfräsen des Nahtübergangs

Durch das Überschleifen mittels Schleifscheibe bzw. Ausfräsen des Nahtübergangs (NÜ) lässt sich durch die Vergrößerung des Kerbradius und dem Entfernen mikroskopischer Ungenzen die Ermüdungsfestigkeit erhöhen. Durch das Ausfräsen des NÜ lassen sich Steigerungen der Ermüdungsfestigkeit von bis zu 200% erreichen [28]. Das Überschleifen mittels Schleifscheibe hat eine vergleichsweise geringe Effektivität von 11 – 70% [28]. Die IIW-Richtlinie [16] empfiehlt für Kerbdetails deren NÜ mit einem Frässtift nach den Vorgaben der IIW-Richtlinie [29] ausgefräst wurde, eine 30%ige Erhöhung der Bemessungsermüdungsfestigkeit bis maximal 112 N/mm². Das Überschleifen mittels Schleifscheibe ist in der Richtlinie nicht vorgesehen.

Über die erfolgreiche Anwendung des NÜ-AusfräSENS bei vorgeschädigten Konstruktionen mit Anriss wird in [30] berichtet. Hierbei konnte eine effektive Lebensdauererlängerung durch ein vollständiges Entfernen der Anrisse erreicht werden. In [10] wird das Überschleifen und AusfräSEN zur Ertüchtigung und Reparatur von Bestandskonstruktionen empfohlen, siehe Abbildung 2-2.

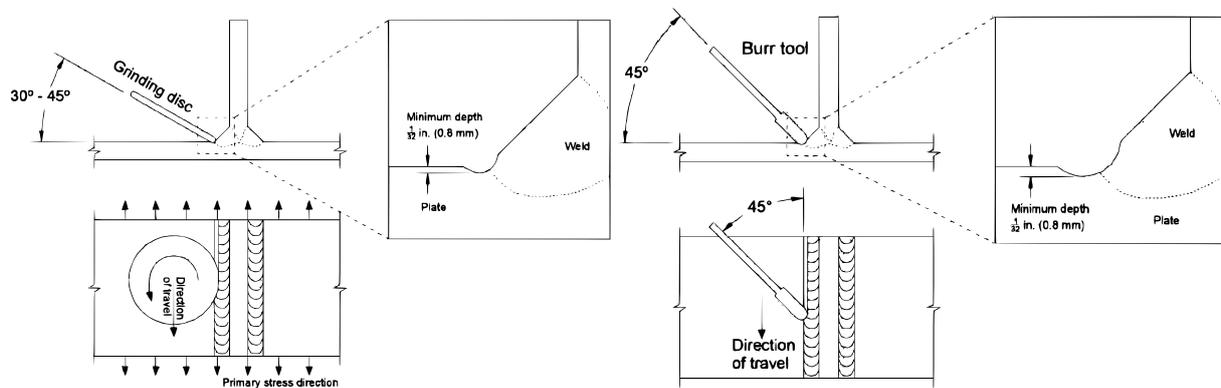


Abbildung 2-2: Anwendungsempfehlungen für das Überschleifen bzw. Ausfräsen des Nahtübergangs gem. [10]

Lokale Querschnittsverstärkungen mittels Blechlamellen

Durch das Anbringen von Blechlamellen können ermüdungskritische Kerbdetails verstärkt werden. Durch die lokale Querschnittsvergrößerung wird die schädigungswirksame Spannungsschwingbreite am Kerbdetail reduziert, wodurch eine Verlängerung der Lebensdauer möglich ist.

Geschraubte Verstärkungslamellen werden bereits häufig bei Bestandsbrücken zur Erhöhung der statischen Tragfähigkeit sowie des Widerstands gegen Ermüdung eingesetzt. Neben einfachen Flachblechen können auch Profile als Verstärkungsquerschnitt verwendet werden, siehe [31].

Ist im Bestandsbauwerk ein Ermüdungsriss vorhanden, werden zur Verlangsamung des Risswachstums oft Verstärkungsbleche in Kombination mit Stop-Hole-Bohrungen (Ausbohren der Rissspitze) angebracht, vgl. [32]. Im Zuge eines Forschungsprojekts [32] wurden Prüfkörper mit seitlich angeschweißtem Knotenblech bis zum Anriss vorgeschädigt und mit 3 verschiedenen Methoden, siehe Abbildung 2-3, repariert und verstärkt. Das angeschraubte Verstärkungsblech mit Stop-Hole-Bohrung zeigte die höchste Effektivität und es konnte eine Erhöhung der Kerbklasse von F gem. JNR [33] ($\Delta\sigma_c = 65 \text{ N/mm}^2$ bei 2×10^6 Lastwechseln) auf C ($\Delta\sigma_c = 125 \text{ N/mm}^2$ bei 2×10^6 Lastwechseln) erreicht werden.

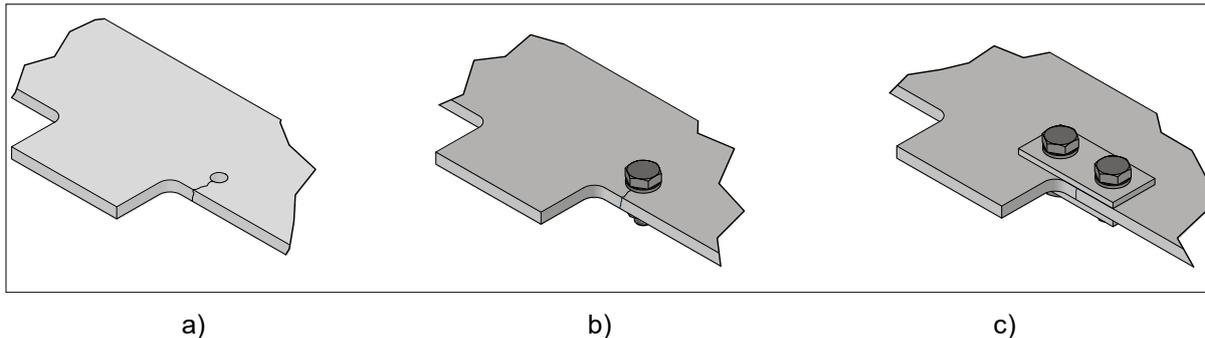


Abbildung 2-3: Untersuchte Reparaturmethoden in [32] - a) Stop-Hole-Bohrung, b) Stop-Hole-Bohrung mit HV-Schraube, c) Stop-Hole-Bohrung mit angeschraubter Lamelle (HV-Schrauben)

In [34] und [35] wurden Träger mit aufgeschweißten Lamellen – Kerbkategorie E gem. [36] ($\Delta\sigma_c = 56 \text{ N/mm}^2$ bei 2×10^6 Lastwechseln) bis zum Anriss an den Stirnnähten der Lamellen vorgeschädigt. Die gerissenen Lamellenenden wurden daraufhin mit Blechen, welche mittels HV-Schrauben befestigt wurden, verstärkt. Die anschließend erreichte Lebensdauererlängerung entsprach der Kerbkategorie B gem. [36] ($\Delta\sigma_c = 125 \text{ N/mm}^2$ bei 2×10^6 Lastwechseln).

In [37] sind weitere Beispiele von Reparaturen bzw. Verstärkungen mit aufgeschraubten Blechen an brückentypischen Kerbdetails enthalten.

Reparaturschweißung mit und ohne HFH-Nachbehandlung

Wird bei einer Bauwerksinspektion ein Ermüdungsriss entdeckt, ist die Reparaturschweißung eine Möglichkeit die Lebensdauer des Bauteils zu verlängern. Vor der Reparatur wird der bestehende Riss z.B. mit einem Winkelschleifer gründlich ausgeschliffen. Mit einer Farbeindring- (PT) oder Magnetpulverprüfung (MT) kann kontrolliert werden, ob die Rissspitze vollständig entfernt wurde. Dies ist für eine wirksame Reparaturschweißung unerlässlich. In zahlreichen Forschungsvorhaben [30], [38], [39], [40] wurde die Ermüdungsfestigkeit von reparaturgeschweißten Kerbdetails – Quersteife, Stumpfstoß, Lamellenende - untersucht. Hierbei konnten je nach Prüfserie durchschnittliche Lebensdauererlängerungen von 128 bis 396% erreicht werden.

In [21] wurden Quersteifenprobekörper aus S235 bis zum Anriss vorgeschädigt, reparaturgeschweißte und anschließend HFH-nachbehandelt. Die anschließend erreichte Lebensdauererlängerung betrug durchschnittlich 317%.

Empfehlungen zur Durchführung von Reparaturschweißungen sind z.B. in [10] enthalten.

3 Bedarfsanalyse | AP 1

Im Zuge des ersten Arbeitspakets wurden besonders kritische Konstruktionsdetails von Kranbahnträgern, siehe Abbildung 3-1, für eine weitergehende Untersuchung identifiziert. Hierfür wurden in der Literatur nach Schäden an Kranbahnen, die im Zuge der Nutzung entstanden sind, und Konstruktionsdetails mit erhöhtem Schädigungspotential gesucht. Zusätzlich wurden Interviews mit Ingenieuren, die sich mit der Bewertung, dem Umbau, der Reparatur oder dem Austausch von Bestandskranbahnträgern sowie den Betreiber von Kranbahnen durchgeführt.

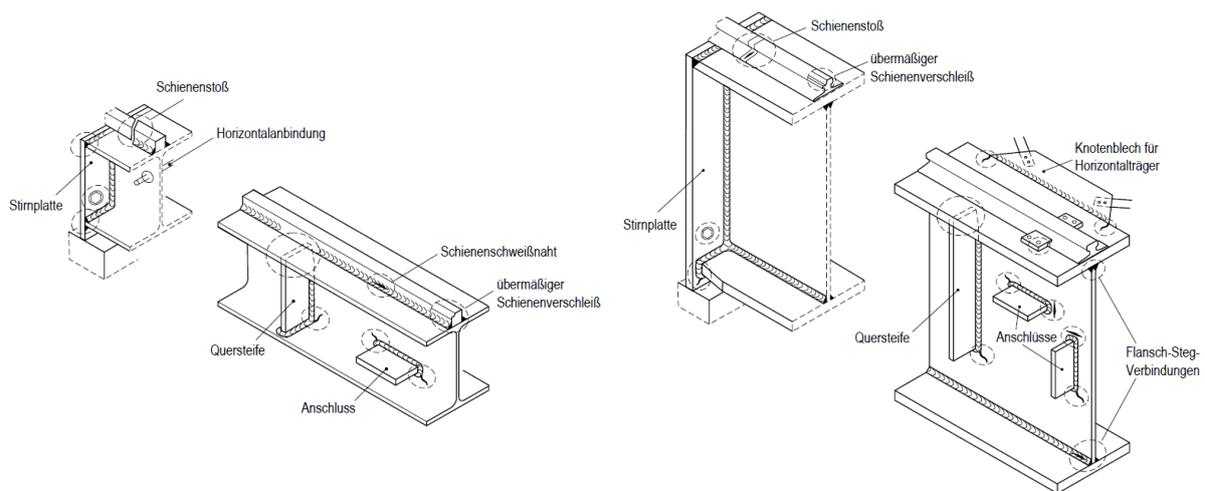


Abbildung 3-1: Kritische Kerbdetails von Kranbahnen [12]

Somit ergibt sich ein breites Spektrum an Schadensfällen, vgl. Tabelle 3-1 und Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3. Die Experteninterviews wurden stichpunktartig in Protokollen zusammengefasst und können dem Anhang A entnommen werden. In der Tabelle 3-1 wird mit der Abkürzung I und einer Nummer auf die jeweiligen Interviews im Anhang verwiesen.

Tabelle 3-1: Schadensfälle an Kranbahnträgern

Konstruktionsdetail	Schaden	Quelle
Kranbahnträgerstoß	Plastische Verformung	[4]
Steg-Gurt-Verbindung	Ermüdungsriß	I1, I2, I4, [41], [42], [43], [44]
Kopfplattenanschluss (Trägerstoß)	Lose Schrauben	[44]
Quersteife	Ermüdungsriß	I2, I3, I5, [4]
Seitlich angebrachte Knotenbleche	Ermüdungsriß	I1, I2, I4, [43]
Steg im Auflagerbereich	Ermüdungsriß	I4, [44]
Unterbrochene Schienenschweißnaht	Ermüdungsriß	I4, [43], [44]
Horizontalhalterung am Auflager (Gewindestangen)	Ermüdungsriß	I5
Schrauben am Auflager	Ermüdungsriß	[43], [45]
Gurtverstärkung (seitlich angeschweißte Winkelprofile)	Ermüdungsriß	I5, [43]
Schienenklemme	Lose Schrauben	[42], [43], [44]
	Ermüdungsriß	[43]
Konsole	Ermüdungsriß	[43], [44]

Für die weiteren Untersuchungen wurden aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit bei experimentellen Untersuchungen die Konstruktionsdetails Schienenklemme, Quersteife und seitlich angebrachtes Knotenblech ausgewählt.

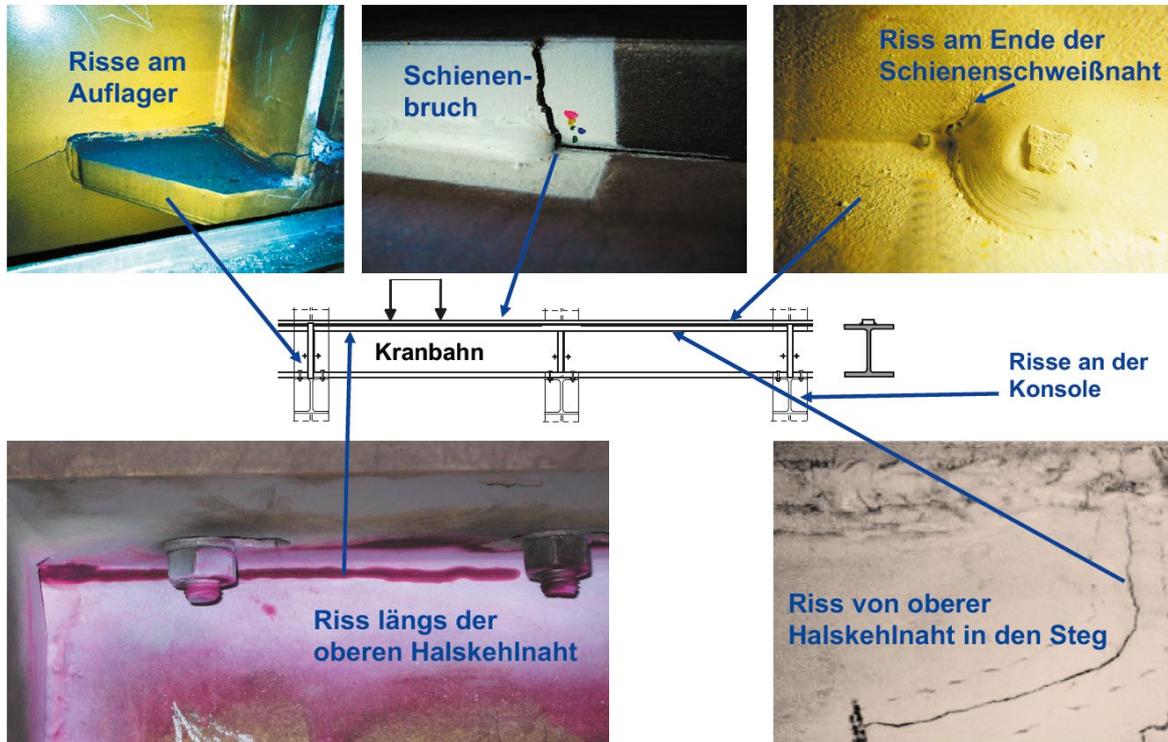


Abbildung 3-2: Typische Schäden an Kranbahnträgern [44]

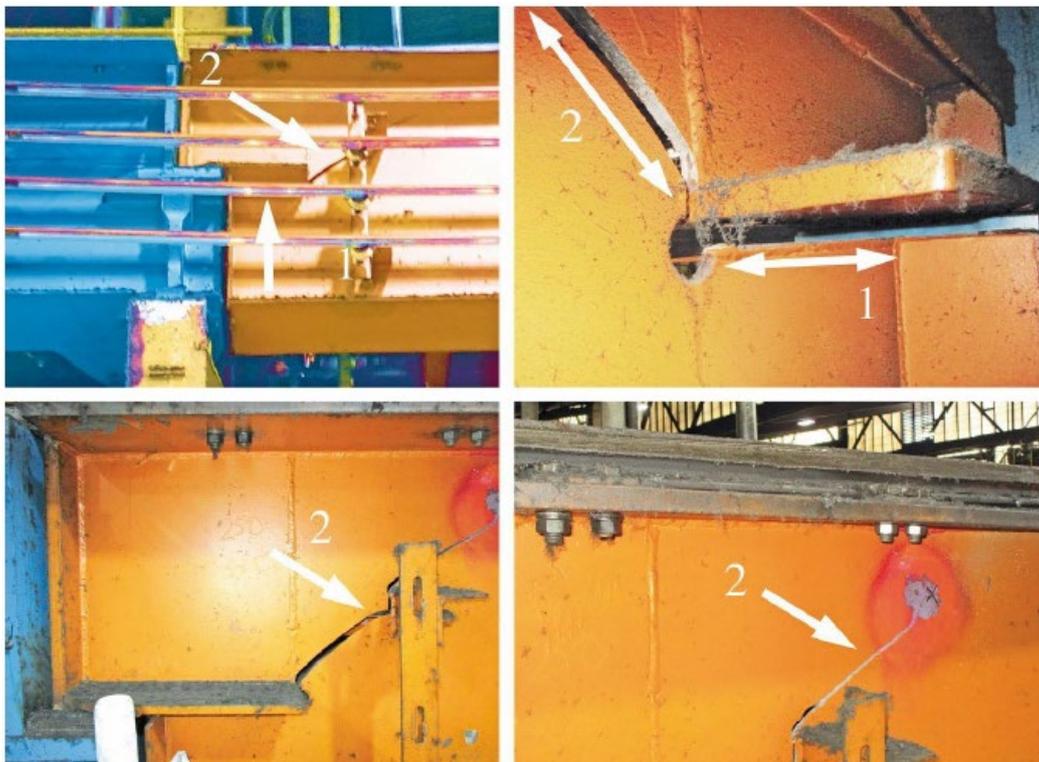


Abbildung 3-3. Risse an einem Kranbahnauflager [46]

7 Ausblick

Durch die Bearbeitung der Arbeitspakete 1 bis 7, siehe Abbildung 1-2, konnte ein Beitrag zum sicheren Weiterbetrieb von Kranbahnträgern und somit zur nachhaltigen Erhaltung von ermüdungsgefährdeten Stahlbauten im Industriebau geleistet werden.

Folgende Punkte sind für eine weiterführende Bewertung von Bestandskranbahnträgern und somit einer Ausweitung der Empfehlungen, die auf Basis der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse formuliert wurden, zu klären:

- Nicht spannungsarm geglühte Schweißdetails unter druckschwellender Ermüdungsbelastung zeigen die eindeutige Tendenz einer stark erhöhten Ermüdungsfestigkeit gegenüber Zugschwellbelastungen, siehe Abschnitt 4.6. Kann diese Tendenz durch weitere experimentelle Untersuchungen bestätigt werden, ist eine genauere Berechnung der Schädigungssumme von Kerbdetails im Druckschwellbereich wie z.B. am Oberflansch eines Einfeldkranbahnträgers möglich. Hierdurch könnte die Restlebensdauer ebendieser ermüdungskritischer Details realistischer bestimmt werden, wodurch möglicherweise überflüssige Ertüchtigungsmaßnahmen verhindert werden könnten. Hierdurch würde ein weiterer Beitrag zum sicheren und wirtschaftlichen Weiterbetrieb von Bestandskranbahnträgern geschaffen werden.
- Bei der Festlegung von sicheren Inspektionsintervallen, siehe Empfehlung in Abschnitt 5.2.2, ist möglicherweise die bruchmechanische Bestimmung eines sicheren Betriebszeitintervalls notwendig. Um eine umfassende Empfehlung für die Durchführung eines solchen Nachweises für Bestandskranbahnträger formulieren zu können, müssen im Rahmen einer Parameterstudie die Einflüsse aus Bauteilgeometrie, der Vielzahl an kranbahntypischen Kerbdetails sowie der Beanspruchung aus dem Kranbetrieb geklärt werden. Dies soll im Rahmen einer angestrebten Promotion geschehen, siehe Maßnahme E im Abschnitt Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft.
- Für die rechnerische Neubewertung eines Bestandkranbahnträgers muss ebendieser möglichst genau abgebildet werden. Hierbei müssen mögliche Zwängungen z.B. durch Auflagerkonstruktionen oder den Anschluss von Horizontalverbänden auf der sicheren Seite liegend berücksichtigt werden. Hierfür sind weitere numerische und experimentelle Untersuchungen notwendig, welche im Rahmen des IGF-Projekts: „Bewertung bestehender Kranbahnen für den Weiterbetrieb zur Verbesserung der Ressourceneffizienz“ siehe Maßnahme F im Abschnitt Ergebnistransfer in Wirtschaft und Wissenschaft.

8 Literaturverzeichnis

- [1] „DIN EN 1993-6:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_ - Teil 6: Kranbahnen; Deutsche Fassung EN_1993-6:2007_ + AC:2009“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1723738.
- [2] „DIN 4132: Kranbahnen; Deutsche Fassung DIN_4132:1981“, Beuth Verlag GmbH, Feb. 1981.
- [3] „DIN EN 1993-6/NA:2017-11, Nationaler Anhang_ - National festgelegte Parameter_ - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_ - Teil 6: Kranbahnen“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2744642.
- [4] C. Seeßelberg, „Typische Fehler bei Planung, Fertigung und Betrieb von Kranbahnträgern und ihre Vermeidung“, *Stahlbau*, Bd. 90, Nr. S1, S. 2–13, Dez. 2021, doi: 10.1002/stab.202100061.
- [5] M. Euler und U. Kuhlmann, „Bemessung von Kranbahnen nach DIN EN 1993-6“, in *STAHLBAU KALENDER 2017*, 1. Aufl., U. Kuhlmann, Hrsg., Wiley, 2017, S. 343–497. doi: 10.1002/9783433607633.ch7.
- [6] „DIN 15018-1: Krane; Grundsätze für Stahltragwerke; Berechnung; DIN 15018-1:1984-11“, Beuth Verlag GmbH, Nov. 1984.
- [7] „TGL 13 471: Stahltragwerke für Kranbahnen - Berechnung nach zulässigen Spannungen; Deutsche Fassung TGL_13_471:1969“, Nov. 1969.
- [8] U. Kuhlmann, M. Euler, und Universität Stuttgart, Hrsg., *Bestimmung der Sicherheitselemente für die Anwendung von DIN EN 1993-6: Kranbahnen - Ausarbeitung eines Vorschlags und einer Begründung für den deutschen Nationalen Anhang: Abschlussbericht*. in *Bauforschung T*, no. 3252. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- [9] „DIN 1076:1999-11, Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen_ - Überwachung und Prüfung“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/8499929.
- [10] R. Dexter *u. a.*, „Manual for Repair and Retrofit of Fatigue Cracks in Steel Bridges - FHWA Publication No. FHWA-IF-13-020“. Federal Highway Administration, 2013.
- [11] „VDI 6200: Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung; Deutsche Fassung VDI_6200:2010“, Beuth Verlag GmbH, Feb. 2010.
- [12] „Richtlinie BFS-RL 07-104: Inspektion von Kranbahnträgern nach DIN EN 1993-6/NA“. November 2018.
- [13] Ausschuss für Technik im DVS - Arbeitsgruppe A 5 „Schweißen im Bauwesen“, „Merkblatt DVS 1709 - Instandsetzung und Verstärkung von geschweißten Stahlbrücken“. November 2022.
- [14] „DIN EN 15643:2021-12, Nachhaltigkeit von Bauwerken_ - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken; Deutsche Fassung EN_15643:2021“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3239367.
- [15] *Ermüdungsbemessung bei Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren*. in *DAST-Richtlinien*, no. 26. Düsseldorf: Stahlbau, 2019.
- [16] A. F. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, 2nd ed. 2016. in *IIW Collection*. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-23757-2.
- [17] G. B. Marquis und Z. Barsoum, *IIW Recommendations for the HFMI Treatment: For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints*, 1st ed. 2016. in *IIW Collection*. Singapore: Springer Singapore : Imprint: Springer, 2016. doi: 10.1007/978-981-10-2504-4.
- [18] A. Dürr und M. Winkler, „Anwendung von höherfrequenten Hämmerverfahren bei Kranbahnträgern“, *Stahlbau*, Bd. 90, Nr. S1, S. 21–35, Dez. 2021, doi: 10.1002/stab.202100075.
- [19] „DIN EN 1993-1-9:2009, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1722660.
- [20] T. Ummenhofer und U. Kuhlmann, *REFRESH - Lebensdauererlängerung bestehender und neuer geschweißter Stahlkonstruktionen =: REFRESH - extension of the fatigue life of existing and new welded steel structures*. in *Forschung für die Praxis D, Dokumentation*, no. 761. Düsseldorf: Verl. und Vertriebsges, 2010.
- [21] U. Kuhlmann, T. Ummenhofer, K. Kudla, und P. Weidner, „Abschlussbericht: Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenten Hämmerverfahren im Stahlwasserbau“. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2013.
- [22] H.-P. Günther, U. Kuhlmann, und A. Dürr, „Rehabilitation of Welded Joints by Ultrasonic Impact Treatment (UIT)“, in *IABSE Symposium, Lisbon 2005: Structures and Extreme Events*, Lisbon, Portugal: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2005, S. 71–77. doi: 10.2749/222137805796271233.

- [23] H. Al-Karawi, R. U. F. Von Bock Und Polach, und M. Al-Emrani, „Fatigue life extension of existing welded structures via high frequency mechanical impact (HFMI) treatment“, *Engineering Structures*, Bd. 239, S. 112234, Juli 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112234.
- [24] Y. Kudryavtsev u. a., „Rehabilitation and Repair of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening“, *Weld World*, Bd. 51, Nr. 7–8, S. 47–53, Juli 2007, doi: 10.1007/BF03266585.
- [25] M. Leitner, Z. Barsoum, und F. Schäfers, „Crack propagation analysis and rehabilitation by HFMI of pre-fatigued welded structures“, *Weld World*, Bd. 60, Nr. 3, S. 581–592, Mai 2016, doi: 10.1007/s40194-016-0316-x.
- [26] C. M. Branco, V. Infante, und R. Baptista, „Fatigue behaviour of welded joints with cracks, repaired by hammer peening“, *Fat Frac Eng Mat Struct*, Bd. 27, Nr. 9, S. 785–798, Sep. 2004, doi: 10.1111/j.1460-2695.2004.00777.x.
- [27] H. Zhang, D. Wang, L. Xia, Z. Lei, und Y. Li, „Effects of ultrasonic impact treatment on pre-fatigue loaded high-strength steel welded joints“, *International Journal of Fatigue*, Bd. 80, S. 278–287, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.06.017.
- [28] I. F. C. Smith und M. A. Hirt, „A review of fatigue strength improvement methods“, *Can. J. Civ. Eng.*, Bd. 12, Nr. 1, S. 166–183, März 1985, doi: 10.1139/l85-016.
- [29] P. J. Haagensen und S. J. Maddox, „IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures - XIII-1815-00“. The International Institute of Welding, 2006.
- [30] J. W. Fisher, „Detection and repair of fatigue damage in welded highway bridges“, *NCHRP Report*, 1979.
- [31] H. H. Snijder und B. H. Hesselink, „Repair, strenghtening and upgrading of steel bridges in The Netherlands“, in *Engineering the Future : Proceedings of the 39th IABSE Symposium, 21-23 September 2017*, Vancouver, Canada: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2018, S. 1177–1184.
- [32] C. Miki, *Retrofitting Engineering for Fatigue Damaged Steel Structures - Doc.IIW-XIII-2284r2-13*. International Institute of Welding, 2013.
- [33] J. S. of S. Construction, *Fatigue design recommendations for steel structures*. in JSSC Technical Report. Japanese Society of Steel Construction, 1995. [Online]. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=80isngEACAAJ>
- [34] A. H. Sahli, P. Albrecht, und D. W. Vannoy, „Fatigue Strength of Retrofitted Cover Plates“, *J. Struct. Eng.*, Bd. 110, Nr. 6, S. 1374–1388, Juni 1984, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:6(1374).
- [35] A. F. Hassan und M. D. Bowman, „Fatigue Crack Repair of Steel Beams with Tapered Cover Plate Details“, *J. Struct. Eng.*, Bd. 122, Nr. 11, S. 1337–1346, Nov. 1996, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:11(1337).
- [36] *AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATION: Customary U.S. Units 2012*, Part 1: Sections 1-6. Washington, DC: AASHTO, 2012.
- [37] S. Bove, „Bewertung ausgewählter Konstruktionsdetails von Straßenbrücken unter Berücksichtigung der Ermüdung“, 2022, doi: 10.18419/OPUS-12206.
- [38] J. L. Carrato, „Should welding be used to repair structural steel“, *Arema 1999 annual conference, trucks and structures, Chicago, IL*, 1999.
- [39] A. Akyel, M. H. Kolstein, und F. S. K. Bijlaard, „Fatigue strength of repaired welded connections made of very high strength steels“, *Engineering Structures*, Bd. 161, S. 28–40, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.01.023.
- [40] J. Schubnell, P. Ladendorf, A. Sarmast, M. Farajian, und P. Knödel, „Fatigue Performance of High- and Low-Strength Repaired Welded Steel Joints“, *Metals*, Bd. 11, Nr. 2, S. 293, Feb. 2021, doi: 10.3390/met11020293.
- [41] W. Eichenmüller, „Schäden an geschweißten Kranbahnträgern“, *Schweißen und Schneiden Jahrgang 19*, Bd. Heft 5, S. 222–225, 1967.
- [42] P. Lieberwirth und K. Geißler, „Bewertung der Stand- und Ermüdungssicherheit einer hoch beanspruchten Kranbahnkonstruktion für eine definierte Restnutzungszeit“, *Brandenburgischer Bauingenieurtag (BBIT2014)*, S. 49–68, 2014.
- [43] A. Dürr, A. Dreiling, und J. Bartenbach, „Kranbahnen und Kranhallen im Bestand – Bewertung, Schadensbilder, Weiterbetrieb“, *Stahlbau*, Bd. 88, Nr. S1, S. 39–56, Nov. 2019, doi: 10.1002/stab.201900091.
- [44] C. Seeßelberg, „Inspektionen von Kranbahnen für Brückenkrane nach DIN EN 1993-6“, *Konstruktiver Ingenieurbau*, Bd. Heft 2/2019, S. 51–57, 2019.
- [45] H. Unterweger, A. Taras, und P. Kugler, „Zugverankerung von gelenkig aufgelagerten Kranbahnträgern - Unerwartet hohe Ermüdungsbeanspruchung und verbesserte Detaillösung: Zugverankerung von gelenkig aufgelagerten Kranbahnträgern - Unerwartet hohe Ermüdungsbeanspruchung und verbesserte Detaillösung“, *Stahlbau*, Bd. 84, Nr. 4, S. 239–245, Apr. 2015, doi:

- 10.1002/stab.201510243.
- [46] C. Seeßelberg, *Kranbahnen: planen, konstruieren, berechnen, fertigen, inspizieren, ertüchtigen*, 6., Vollständig überarbeitete und Erweiterte Auflage. in Bauwerk. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2020.
- [47] M. Feldmann, T. Ummenhofer, und U. Kuhlmann, *Neubewertung und Erweiterung des Kerbfallkatalogs nach Eurocode 3 für eine zukunftsfähige Auslegung hochbeanspruchter Stahlkonstruktionen; 4/2019*. in Forschungsbericht. Düsseldorf: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://publications.rwth-aachen.de/record/811714>
- [48] „DIN EN 10025-2:2019-10, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen_- Teil_2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche Fassung EN_10025-2:2019“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3035421.
- [49] „DIN EN 10365:2017-05, Warmgewalzter U-Profilstahl, I- und H-Träger_- Maße und Masse; Deutsche Fassung EN_10365:2017“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2535055.
- [50] „DIN 8033-3:1983-11, Frässtifte aus Hartmetall; Walzenrund-Frässtifte“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1131497.
- [51] „DIN EN 15085-3:2023-07, Bahnanwendungen_- Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen_- Teil_3: Konstruktionsvorgaben; Deutsche Fassung EN_15085-3:2022+A1:2023“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3424598.
- [52] L. Wendler u. a., „Automatisierte Schweißnahtnachbehandlung durch höherfrequentes Hämmern“, *Stahlbau*, Bd. 92, Nr. 7, S. 418–426, Juli 2023, doi: 10.1002/stab.202300021.
- [53] „DIN 609:2016-12, Sechskant-Passschrauben mit langem Gewindezapfen“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2585187.
- [54] „DIN EN 1090-2:2018-09, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken_- Teil_2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN_1090-2:2018“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2758614.
- [55] „DIN EN ISO 286-2:2019-09, Geometrische Produktspezifikation_(GPS)_- ISO-Toleranzsystem für Längenmaße_- Teil_2: Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen (ISO_286-2:2010_+ Cor_1:2013); Deutsche Fassung EN_ISO_286-2:2010_+ AC:2013“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3056515.
- [56] Deutscher Ausschuss für Stahlbau, *Anziehen von geschraubten Verbindungen der Abmessungen M12 bis M36*. in DAST-Richtlinie, no. 024. Düsseldorf: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2018.
- [57] „DIN EN 14399-4:2015-04, Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau_- Teil_4: System HV_- Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern; Deutsche Fassung EN_14399-4:2015“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2159281.
- [58] „DIN EN 1083-2:1997-07, Kraftbetriebene Bürstwerkzeuge_- Teil_2: Sicherheitstechnische Anforderungen; Deutsche Fassung EN_1083-2:1997“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/7352392.
- [59] SLV Duisburg, „Lehrgangsunterlagen - Frosio Beschichtungsinspektor M1 - M10“. GSI mbH Niederlassung SLV Duisburg, 2023.
- [60] „DIN EN ISO 8501-1:2007-12, Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen_- Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit_- Teil_1: Rostgrade und Oberflächenvorbereitungsgrade von unbeschichteten Stahloberflächen und Stahloberflächen nach ganzflächigem Entfernen vorhandener Beschichtungen (ISO_8501-1:2007); Deutsche Fassung EN_ISO_8501-1:2007“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/9871577.
- [61] Deutsches Institut für Bautechnik, „ETA-11/0191“. Deutsches Institut für Bautechnik, 6. Mai 2021.
- [62] „DIN 8593-5:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen_- Teil_5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/9500689.
- [63] „DIN EN 1993-1-8:2010-12, Eurocode_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_- Teil_1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN_1993-1-8:2005_+ AC:2009“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1718737.
- [64] „DVS-EFB Merkblatt 3435–2: 2016–05: Schließringbolzensysteme – Berechnung von Verbindungen nach Eurocode 3 und VDI 2230-Blatt1“. Düsseldorf, DVS Media GmbH, 2016.
- [65] „AbZ - Z-14.4-591 - ‚Schließringbolzen ohne Abrisstheil‘“. Deutsches Institut für Bautechnik, 26. November 2019.
- [66] „DIN EN ISO 898-1:2013-05, Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl_- Teil_1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen_- Regelgewinde und Feingewinde (ISO_898-1:2013); Deutsche Fassung EN_ISO_898-1:2013“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1918383.
- [67] H. A. Städler, V. Thoms, und M. C. Wanner, *Schließringbolzen ohne Sollbruchstelle für wartungsfreie Verbindungen im Nutzfahrzeug- und Stahlbau*. Saechsische Landesbibliothek- Staats- und Universitaetsbibliothek Dresden, 2012. [Online]. Verfügbar unter:

- <https://books.google.de/books?id=F2ZzIAEACAAJ>
- [68] Verein Deutscher Ingenieure e.V., *VDI 2230 Blatt 1 - Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen*. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH, 2015.
- [69] A. Ebert, *Ein Beitrag zur versuchsgestützten Ermittlung des Gleitwiderstandes vorgespannter Stahlbauverbindungen*. Universität Rostock, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=ofaszQEACAAJ>
- [70] C. Schuler, M. Feldmann, und K. Dilger, *Klebtechnische Ertüchtigung von Ermüdungsschäden für Konstruktionen des Stahlbaus: Schlussbericht vom 26.01.2022 zu IGF-Vorhaben Nr. 19963 N: Berichtszeitraum: 01.02.2018-31.07.2021 = Strengthening due to bonding technology of fatigue damages for design used in steel construction*. in *Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. P*, no. 1296. Düsseldorf: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 26.
- [71] „DIN EN ISO 21920-2:2022-12, Geometrische Produktspezifikation_(GPS)_- Oberflächenbeschaffenheit: Profile_- Teil_2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit (ISO_21920-2:2021, korrigierte Fassung 2022-06); Deutsche Fassung EN_ISO_21920-2:2022“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3294017.
- [72] „DIN EN ISO 8503-4:2012-06, Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen_- Rauheitskenngrößen von gestrahlten Stahloberflächen_- Teil_4: Verfahren zur Kalibrierung von ISO-Rauheitsvergleichsmustern und zur Bestimmung der Rauheit_- Tastschnittverfahren (ISO_8503-4:2012); Deutsche Fassung EN_ISO_8503-4:2012“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1858342.
- [73] T. Ummerhofer, et. al, *Einsatz von geklebten Kohlestoff-Faserverbundwerkstoffen zur Sanierung ermüdungsgeschädigter Stahlkonstruktionen (FASS). Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 19032 BG*. Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V., 2019.
- [74] Y. J. Kasper, „Auslegung von Verstärkungen ermüdungsgeschädigter Stahlbauteile mit aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen“, 2023, doi: 10.5445/IR/1000157204.
- [75] Ö. Bucak, S. Rodic, H. Ehard, und H. Strohbach, „Walzprofile mit aufgeschweißten Schienenklemmen: Ermüdungsverhalten unter Druckbeanspruchung“, *Stahlbau*, Bd. 84, Nr. 9, S. 667–672, Sep. 2015, doi: 10.1002/stab.201510305.
- [76] Y. Murakami, Hrsg., *Stress intensity factors handbook*, 1st ed. Oxford [Oxfordshire]; New York: Pergamon, 1987.
- [77] T. R. Gurney, *Fatigue of welded structures*, 2nd Edition. London: Cambridge Univ. Press, 1979.
- [78] „DIN EN 1993-1-10:2010-12, Eurocode_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_- Teil_1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung; Deutsche Fassung EN_1993-1-10:2005_+ AC:2009“. Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1722661.
- [79] B. Kühn, *Beitrag zur Vereinheitlichung der europäischen Regelungen zur Vermeidung von Sprödbruch*. in *Stahlbau*, no. H. 54. Aachen: Shaker, 2005.
- [80] „DIN EN 1991-1-5:2010-12, Eurocode_1: Einwirkungen auf Tragwerke_- Teil_1-5: Allgemeine Einwirkungen_- Temperatureinwirkungen; Deutsche Fassung EN_1991-1-5:2003_+ AC:2009“. Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1723932.
- [81] „DIN EN 1990/NA:2010-12, Nationaler Anhang_- National festgelegte Parameter_- Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung“. Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1707463.
- [82] „DIN EN 1991-3:2010-12, Eurocode_1: Einwirkungen auf Tragwerke_- Teil_3: Einwirkungen infolge von Kranen und Maschinen; Deutsche Fassung EN_1991-3:2006“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1723939.
- [83] O. Caglayan, K. Ozakgul, O. Tezer, und E. Uzgider, „Fatigue life prediction of existing crane runway girders“, *Journal of Constructional Steel Research*, Bd. 66, Nr. 10, S. 1164–1173, Okt. 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.04.009.
- [84] „DIN EN 13001-1:2015-06, Krane_- Konstruktion allgemein_- Teil_1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen; Deutsche Fassung EN_13001-1:2015“. Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2311555.
- [85] R. P. Harrison, K. Loosemore, I. Milne, und C. E. G. Board, *Assessment of the integrity of structures containing defects, supplement 3. worked examples*. Central Electricity Generating Board., 1986.
- [86] M. Mensinger, M. Rengstl, S. Heiderich, D. Reissmüller, und D. Siebert, „Überarbeitung des Betriebszeitintervallnachweises der Ril 805“, *Stahlbau*, Bd. 90, Nr. 2, S. 93–105, Feb. 2021, doi: 10.1002/stab.202000105.
- [87] „DIN EN ISO 5817:2014-06, Schweißen_- Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen)_- Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO_5817:2014); Deutsche Fassung EN_ISO_5817:2014“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2060318.
- [88] „DIN EN ISO 17637:2017-04, Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen_- Sichtprüfung

- von Schmelzschweißverbindungen (ISO_17637:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_17637:2016“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2527032.
- [89] „DIN EN ISO 3452-1:2022-02, Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO_3452-1:2021); Deutsche Fassung EN_ISO_3452-1:2021“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3246639.
- [90] „DIN EN ISO 17638:2017-03, Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Magnetpulverprüfung (ISO_17638:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_17638:2016“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2517670.
- [91] „DIN EN ISO 9712:2022-09, Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung (ISO_9712:2021); Deutsche Fassung EN_ISO_9712:2022“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3301059.