

# **Einfluss des Höherfrequenten Hämmerns auf die Ermüdungs- festigkeit geschweißter ultrahochfester Feinkornbaustähle**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften,  
der Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Jörn Berg M.Sc.

aus Bottrop

Referentin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Eingereicht: 06. Juni 2016

Mündliche Prüfung: 26. September 2016

Abteilung Bauwissenschaften der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Institut für Metall- und Leichtbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner



Schriftenreihe Institut für Metall- und Leichtbau  
Universität Duisburg-Essen  
herausgegeben von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Band 4

**Jörn Berg**

**Einfluss des Höherfrequenten Hämmerns  
auf die Ermüdungsfestigkeit geschweißter  
ultrahochfester Feinkornbaustähle**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4978-7

ISSN 1867-6782

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Doktormutter Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner für ihr Vertrauen, ihre stete Unterstützung und ihre zahlreichen Ratschläge sowie das sehr familiäre Arbeitsumfeld am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Doru C. Lupascu gilt mein Dank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Metall- und Leichtbau danke ich für die Unterstützung während der finalen Ausarbeitung, die freundschaftliche Atmosphäre und die gute Zusammenarbeit. Weiterhin bedanke ich mich bei den Verfassern der von mir betreuten Abschlussarbeiten, die thematisch an das Thema dieser Arbeit angelehnt waren.

Schließlich danke ich meiner Familie, meinen Eltern und insbesondere meiner Frau Katharina herzlich für die grenzenlose Unterstützung und Geduld während der Ausarbeitung meiner Promotion.

Bottrop, im Dezember 2016

Jörn Berg



## **Kurzfassung**

Bestehende Bemessungsvorschläge zur Berücksichtigung einer Schweißnahtnachbehandlung mittels höherfrequenten Hämmerns (HFH) decken lediglich Stahlsorten bis maximal S960 und Blechdicken größer gleich 5 mm ab. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses einer HFH-Behandlung auf das Ermüdungsverhalten geschweißter, ultrahochfester Feinkornbaustähle mit Streckgrenzen von  $960 \text{ N/mm}^2$  und höher im oberen Zeitfestigkeitsbereich und die Entwicklung eines Vorschlags zur Bemessung von HFH-behandelten Schweißverbindungen für diese Stahlsorten. Innerhalb von Ermüdungsversuchen wird der Einfluss einer HFH-Behandlung an vier kranbautypischen Kerbdetails aus ultrahochfesten Feinkornbaustählen S960, S1100 und S1300 erfasst. Mit Hilfe analytischer und numerischer Methoden wird der Einfluss der aus dem Schweißprozess resultierenden Imperfektionen Axialversatz, Winkelverzug sowie der lokalen Nahtgeometrie auf den Beanspruchungszustand an der Nahtübergangskerbe untersucht. Auf Grundlage der eigenen Versuchsergebnisse und aus der Literatur ausgewerteten Versuchsreihen wird abschließend ein Bemessungskonzept zur Erfassung des Einflusses einer HFH-Behandlung auf die Ermüdungsfestigkeit geschweißter, ultrahochfester Feinkornbaustähle S960 und höher entwickelt.

**Abstract**

Existing design recommendations for the consideration of the post weld treatment method high frequency hammer peening (HFHP) are limited to steel grades of S960 and plate thicknesses of 5 mm and higher. The intention of the present work is to investigate the influence of the HFHP treatment on the fatigue behaviour of welded ultra high strength fine grained structural steels with yield strengths of 960 N/mm<sup>2</sup> and higher within the upper finite fatigue life region and to develop a design proposal for HFHP treated welded joints for these steel grades. Within fatigue tests the influence of HFHP treatment on four typical welded notch details of mobile crane structures made of S960, S1100 and S1300 is determined. The influence of weld imperfections like linear misalignment, angular misalignment and the local weld geometry on the stress at the weld toe is evaluated by analytic and numerical methods. Based on the results of the own fatigue tests and evaluated fatigue test results of the literature a design concept for the consideration of the influence of HFHP treatment on the fatigue strength of welded ultra high strength fine grained structural steels S960 and higher is proposed.

# Inhaltsverzeichnis

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>  | <b>I</b>     |
| <b>Abkürzungen und Symbole .....</b>   | <b>V</b>     |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>   | <b>XIII</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>   | <b>XXIII</b> |
| <b>1 Einleitung.....</b>   | <b>1</b>     |
| 1.1 Problemstellung.....   | 1            |
| 1.2 Zielsetzung .....  | 3            |
| 1.3 Zusammenfassender Überblick.....   | 4            |
| <b>2 Stand der Technik.....</b>  | <b>7</b>     |
| 2.1 Allgemeines.....   | 7            |
| 2.2 Ultrahochfeste Feinkornbaustähle.....  | 8            |
| 2.3 Ermüdungsverhalten von Stahlkonstruktionen .....   | 14           |
| 2.3.1 Grundlagen .....   | 14           |
| 2.3.2 Methoden zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit.....   | 19           |
| 2.4 Höherfrequentes Hämmern als Schweißnahtnachbehandlungsmethode<br>zur Steigerung der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Kerbdetails ..... | 23           |
| 2.5 Bemessungskonzepte zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit .....  | 31           |
| 2.5.1 Schweißverbindungen.....   | 31           |
| 2.5.2 Empfehlungen zur Berücksichtigung von Höherfrequentem<br>Hämmern .....   | 35           |
| 2.6 Zusammenfassung.....   | 47           |
| <b>3 Statistische Auswertung von Versuchsdaten existierender<br/>    Untersuchungen.....</b>   | <b>49</b>    |
| 3.1 Allgemeines.....   | 49           |
| 3.2 Sammlung von Versuchsdaten.....  | 49           |
| 3.3 Vorgehensweise der statistischen Auswertung .....  | 51           |
| 3.4 Auswertung der betrachteten Versuchsreihen.....  | 56           |
| 3.4.1 Tabellarische Darstellung.....   | 56           |
| 3.4.2 Wöhlerlinienneigung $m$ .....  | 56           |

|   |            |
|---|------------|
| 3.4.3 Standardabweichung $s$ ( $\log N$ ) .....   | 62         |
| 3.4.4 Streckgrenzeinfluss .....   | 64         |
| 3.4.5 Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit infolge HFH .....  | 70         |
| 3.4.6 <i>Wöhler</i> diagramme .....   | 74         |
| 3.5 Zusammenfassung .....   | 83         |
| <b>4 Experimentelle Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten</b>   |            |
| <b>  geschweißter ultrahochfester Feinkornbaustähle .....</b>   | <b>87</b>  |
| 4.1 Allgemeines .....   | 87         |
| 4.2 Versuchsprogramm und Versuchskörper .....   | 88         |
| 4.3 Material- und Eigenspannungsuntersuchungen .....  | 103        |
| 4.4 Versuchsdurchführung .....  | 106        |
| 4.5 Versuchsergebnisse .....  | 108        |
| 4.5.1 Versagensmodi (Rissinitiierung) .....   | 108        |
| 4.5.2 Lebensdauer .....   | 112        |
| 4.5.3 Ermüdungsfestigkeit .....   | 113        |
| 4.5.4 Einfluss von einzelnen HFH-Behandlungseindrücken neben der<br>Behandlungsspur auf die Ermüdungsfestigkeit ..... | 128        |
| 4.6 Diskussion und Bewertung der Versuchsergebnisse .....   | 129        |
| 4.7 Zusammenfassung .....   | 132        |
| <b>5 Analysen zu den Einflüssen von Imperfektionen .....</b>  | <b>135</b> |
| 5.1 Allgemeines .....   | 135        |
| 5.2 Berücksichtigung von Imperfektionen .....   | 135        |
| 5.3 Imperfektionen .....  | 138        |
| 5.3.1 Axialversatz .....  | 138        |
| 5.3.2 Winkelverzug .....  | 141        |
| 5.3.3 Verifikation der Spannungsvergrößerungsfaktoren durch<br>Dehnungsmessungen .....                                | 147        |
| 5.3.4 Nahtgeometrie .....   | 149        |
| 5.4 Korrelation zwischen Imperfektionen und Versuchsergebnissen .....   | 153        |
| 5.5 Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung von Imperfektionen .....  | 158        |
| 5.6 Zusammenfassung .....   | 167        |
| <b>6 Einordnung der Versuchsergebnisse in bestehende</b>  |            |
| <b>  Bemessungskonzepte zum Nachweis der Ermüdung .....</b>   | <b>169</b> |
| 6.1 Allgemeines .....   | 169        |
| 6.2 Kerbdetails mit unbehandelten Nahtübergängen .....  | 169        |
| 6.3 Kerbdetails mit HFH-behandelten Nahtübergängen .....  | 176        |
| 6.4 Zusammenfassung .....   | 184        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>7 Ableitung von Kerbfallklassen zur Bemessung HFH-behandelter Schweißverbindungen aus ultrahochfesten Stählen .....</b> | <b>185</b> |
| 7.1 Allgemeines .....  | 185        |
| 7.2 Einfluss von Streckgrenze und Kerbdetail .....   | 186        |
| 7.3 Berücksichtigung von experimentell nicht untersuchten Faktoren .....   | 195        |
| 7.3.1 Spannungsverhältnis R .....  | 195        |
| 7.3.2 Blechdickeneinfluss .....  | 196        |
| 7.3.3 Bauteileinfluss .....  | 197        |
| 7.3.4 Einfluss von Überlasten .....  | 198        |
| 7.3.5 Einfluss von variablen Lastkollektiven .....   | 199        |
| 7.4 Übertragbarkeit auf die praktische Anwendung .....   | 199        |
| 7.5 Zusammenfassung .....  | 203        |
| <b>8 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>  | <b>205</b> |
| 8.1 Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen .....  | 205        |
| 8.2 Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Untersuchungen .....   | 209        |
| 8.3 Ausblick .....   | 209        |
| <b>9 Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>211</b> |
| 9.1 Normen, Richtlinien und Datenblätter .....   | 211        |
| 9.2 Zitierte Literatur .....   | 212        |
| 9.3 Eigene Veröffentlichungen zum Thema der Arbeit .....   | 223        |
| 9.4 Betreute Abschlussarbeiten .....   | 224        |
| 9.5 Programmsysteme .....  | 225        |
| <b>Anhang A – Vorgehensweise bei der statistischen Auswertung von Versuchsdaten .....</b>                                  | <b>227</b> |
| <b>Anhang B – Tabellarische Darstellung der ausgewerteten Versuchsdaten aus der Literatur .....</b>                        | <b>231</b> |
| <b>Anhang C – Charakterisierung der eingesetzten Werkstoffe .....</b>  | <b>247</b> |
| <b>Anhang D – Charakterisierung der Schweißverbindungen .....</b>  | <b>261</b> |
| <b>Anhang E – Tabellarische Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Ermüdungsversuche .....</b>                      | <b>271</b> |



# Abkürzungen und Symbole

## Abkürzungen

|       |   |
|-------|---|
| AW    | unbehandelte Nahtübergangskerbe (engl.: as welded)            |
| BDS   | Blechdickensprung   |
| CEV   | Kohlenstoffäquivalent   |
| DMS   | Dehnungsmessstreifen  |
| DVS   | Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. |
| EC    | Eurocode  |
| FAT   | Kerbfallklasse (engl.: fatigue class)                         |
| FEM   | Finite Elemente Methode                                       |
| HCF   | Dauerfestigkeitsbereich (engl.: high cycle fatigue)           |
| HFH   | Höherfrequentes Hämmern                                       |
| HiFIT | High Frequency Impact Treatment                               |
| HP    | Hammer Peening  |
| GP    | Großprüfkörper  |
| IIW   | International Institute of Welding                            |
| KV    | Kerbschlagarbeit  |
| La    | Lamelle   |
| LCF   | Kurzzeitfestigkeitsbereich (engl.: low cycle fatigue)         |
| LS    | Längssteife   |
| MAG   | Metall-Aktivgasschweißen                                      |
| MSG   | Metall-Schutzgasschweißen                                     |
| NÜ    | Nahtübergang  |
| OK    | Oberkante   |
| PIT   | Pneumatic Impact Treatment                                    |
| PWT   | Schweißnahtnachbehandlung (engl.: post weld treatment)        |
| QS    | Quersteife  |

|     |   |
|-----|---|
| S   | Stumpfstoß  |
| SEW | Stahl-Eisen-Werkstoffblatt                                |
| UHS | Ultrahochfester Feinkornbaustahl                          |
| UIT | Ultrasonic Impact Treatment                               |
| UK  | Unterkante  |
| UNP | Ultrasonic Needle Peening                                 |
| UP  | Ultrasonic Peening  |
| WEZ | Wärmeeinflusszone   |
| WIG | Wolfram-Inertgas  |
| WPS | Schweißanweisung (engl.: welding procedure specification) |
| WV  | Winkelverzug  |
| ZFP | Zerstörungsfreie Prüfung                                  |

### Lateinische Symbole

|                              |  |
|------------------------------|--|
| $a_0$                        | Größe eines definierten technischen Anrisses   |
| $a_{cr}$                     | kritische Risslänge, die zum Versagen durch Restbruch führt  |
| $A_5$                        | Bruchdehnung   |
| $b$                          | Nahtbreite   |
| $C$                          | Kohlenstoff  |
| $e$                          | Axialversatz   |
| $e_p$                        | planmäßiger Axialversatz beim Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung                                      |
| $e_{pWT}$                    | Eindrücktiefe an der Nahtübergangskerbe nach HFH-Behandlung  |
| $E$                          | Elastizitätsmodul  |
| $f$                          | Frequenz   |
| $f(t)$                       | Blechdickenkorrekturfaktor zur Reduktion der Ermüdungsfestigkeit   |
| $f(R)$                       | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses des Spannungsverhältnisses $R$ auf die Ermüdungsfestigkeit |
| $f_{toe}$                    | Imperfektion bzw. Ausmitte im Bereich des Nahtübergangs  |
| $f_{toe, \text{Einspannen}}$ | aus dem Einspannprozess in die Prüfmaschine resultierende Stabverschiebung im Bereich des Nahtübergangs,       |

|                     |   |
|---------------------|---|
| $f_{toe,structure}$ | aus dem Winkelverzug resultierende Ausmitte im Bereich des Nahtübergangs vor Einbau in die Prüfmaschine,  |
| $f_{toe,test}$      | aus dem Winkelverzug resultierende Ausmitte im Bereich des Nahtübergangs nach Einbau in die Prüfmaschine,   |
| $f_u$               | Nennwert der Zugfestigkeit  |
| $f_y$               | Nennwert der Streckgrenze   |
| $f_{y,nom}$         | Nominalwert der Streckgrenze  |
| $g$                 | Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Biegesteifigkeiten auf das resultierende Biegemoment infolge Axialversatz bei axialer Beanspruchung |
| $h$                 | Nahtüberhöhung  |
| $h$                 | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearität  |
| $I_1$               | Flächenträgheitsmoment im Bereich des Nahtübergangs (Grundblech)  |
| $I_2$               | Flächenträgheitsmoment im Bereich von Schweißgut, Lamelle, Quer- oder Längssteife   |
| $j$                 | Anzahl Versuchsserien   |
| $k$                 | Hilfsfaktor zur Ermittlung des Fraktilwertes  |
| $k_0$               | allgemeiner Verbesserungsfaktor zur Erhöhung der Kerbfallklasse infolge einer HFH-Behandlung  |
| $k_f / k_{Re}$      | Verbesserungsfaktor zur Erhöhung der Kerbfallklasse infolge einer HFH-Behandlung unter Berücksichtigung der Streckgrenze $f_y$                      |
| $k_{FAT}$           | Anzahl der Kerbfallklassenerhöhung infolge einer HFH-Behandlung   |
| $k_{FAT,R}$         | Anzahl der Kerbfallklassenreduktion infolge eines veränderten Spannungsverhältnisses $R$  |
| $k_{imp}$           | finaler Verbesserungsfaktor zur Erhöhung der Kerbfallklasse infolge einer HFH-Behandlung  |
| $k_L$               | Verbesserungsfaktor zur Erhöhung der Kerbfallklasse infolge einer HFH-Behandlung unter Berücksichtigung des Abstandes des Schweißnahtfußpunkte $L$  |
| $k_m$               | Spannungsvergrößerungsfaktor zur Berücksichtigung von Imperfektionen entsprechend der IIW Richtlinien   |
| $k_{m,axial}$       | Spannungsvergrößerungsfaktor zur Berücksichtigung des Axialversatzes  |
| $k_{m,ang}$         | Spannungsvergrößerungsfaktor zur Berücksichtigung des Winkelverzugs   |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $k_{m,ang,lin}$    | Spannungsvergrößerungsfaktor zur Berücksichtigung des Winkelverzugs unter Vernachlässigung der geometrischen Nichtlinearität                                  |
| $k_{m,ang,nonlin}$ | Spannungsvergrößerungsfaktor zur Berücksichtigung des Winkelverzugs unter Ansatz der geometrischen Nichtlinearität  |
| $k_{m,eff}$        | effektiver Spannungsvergrößerungsfaktor zur Berücksichtigung von Imperfektionen unter Ansatz unterschiedlicher Lebensdauern für Zug- und Biegebelastung       |
| $k_R$              | Verbesserungsfaktor zur Erhöhung der Kerbfallklasse infolge einer HFH-Behandlung unter Berücksichtigung des Spannungsverhältnisses $R$                        |
| $k_s$              | Abminderungsfaktor für den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit zur Berücksichtigung der Größenabhängigkeit nach DIN EN 1993-1-9                                |
| $k_y$              | Faktor zur Berücksichtigung des Streckgrenzeinflusses auf die Ermüdungsfestigkeit   |
| $K_t$              | Kerbfaktor  |
| $L$                | Abstand der Schweißnahtfußpunkte  |
| $L_E$              | freie Stablänge zwischen Endauflager und Symmetrieachse   |
| $L_S$              | freie Stablänge zwischen Endauflager und Nahtübergang   |
| $L_t$              | Stablänge zwischen den Nahtübergängen   |
| $m$                | inverse Neigung der <i>Wöhlerlinie</i> im Zeitfestigkeitsbereich  |
| $m_{AW}$           | inverse Neigung der <i>Wöhlerlinie</i> im Zeitfestigkeitsbereich für den unbehandelten Nahtzustand  |
| $m_{HFH}$          | inverse Neigung der <i>Wöhlerlinie</i> im Zeitfestigkeitsbereich für den HFH-behandelten Nahtzustand  |
| $n$                | Anzahl Versuche bzw. Versuchsergebnisse   |
| $N$                | Lastwechselzahl   |
| $N_C$              | Bezugslastwechselzahl ( $2 \cdot 10^6$ )  |
| $N_{calc}$         | aus der auf der mittleren Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_m$ basierenden <i>Wöhlerlinie</i> berechnete Lebensdauer für ein definiertes Beanspruchungsniveau |
| $N_f$              | Lastwechselzahl bis zum Versagen infolge Restbruch (engl.: fatigue failure)   |
| $N_{f,AW}$         | Bruchlastwechselzahl für den unbehandelten Nahtzustand (Versuch)  |
| $N_{f,HFH}$        | Bruchlastwechselzahl für den HFH-behandelten Nahtzustand (Versuch)  |
| $N_i$              | Lastwechselzahl bis zur Entwicklung eines technischen Anrisses (engl.: crack initiation)  |

|                |   |
|----------------|---|
| $N_p$          | Lastwechselzahl bis zum Übergang vom stabilen zum instabilen Risswachstum (engl.: crack propagation)                |
| $P_{\bar{0}}$  | Überlebenswahrscheinlichkeit  |
| $r$            | Kerbradius an der Nahtübergangskerbe  |
| $r_{PWT}$      | Bolzenkopfradius des HFH-Gerätes  |
| $r_{ref}$      | fiktiver Kerbradius an der Nahtübergangs- oder Wurzelkerbe  |
| $r_{tat}$      | tatsächlicher Kerbradius an der Nahtübergangs- oder Wurzelkerbe   |
| $R$            | Spannungsverhältnis zwischen minimaler und maximaler Spannung   |
| $R_{eff}$      | effektives Spannungsverhältnis zwischen minimaler und maximaler Spannung unter Berücksichtigung von Eigenspannungen |
| $R_m$          | Zugfestigkeit (aus dem Zugversuch)  |
| $R_{p0,2}$     | Streckgrenze bzw. 0,2 % Dehngrenze (aus dem Zugversuch)   |
| $s$            | Standardabweichung  |
| $t$            | Blechdicke  |
| $t_{\alpha,n}$ | Wert der Student Verteilung für das Signifikanzniveau $\alpha$ bei $n$ Freiheitsgraden                              |
| $T$            | Temperatur  |
| $T_{\sigma}$   | Streumaß der Ermüdungsversuche  |
| $v$            | Vorschubgeschwindigkeit des HFH-Gerätes   |

### Griechische Symbole

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $\alpha$              | Nahtanstiegswinkel (DIN EN ISO 5817)   |
| $\alpha_{PWT}$        | Behandlungswinkel des HFH-Gerätes längs zur Behandlungsrichtung  |
| $\beta$               | Winkelverzug   |
| $\beta_{AW}$          | Winkelverzug eines Versuchskörpers mit unbehandeltem Nahtzustand   |
| $\beta_{HFH}$         | Winkelverzug eines Versuchskörpers nach der HFH-Behandlung   |
| $\beta_{PWT}$         | Behandlungswinkel des HFH-Gerätes quer zur Behandlungsrichtung   |
| $\Delta f_{y,FAT}$    | Streckgrenzendifferenz, die zur Höherstufung der Ermüdungsfestigkeit um eine Kerbfallklasse korrespondiert (Streckgrenzeinfluss) |
| $\Delta\sigma$        | Spannungsschwingbreite   |
| $\Delta\sigma_{bend}$ | Biegenormalspannungsschwingbreite  |

---

|                           |  |
|---------------------------|--|
| $\Delta\sigma_C$          | charakteristischer Wert der Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln  |
| $\Delta\sigma_{C,95}$     | charakteristischer Wert der Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln für 95 % Überlebenswahrscheinlichkeit  |
| $\Delta\sigma_{C,97,7}$   | charakteristischer Wert der Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln für 97,7 % Überlebenswahrscheinlichkeit  |
| $\Delta\sigma_{C,AW}$     | Kerbfallklasse eines unbehandelten Kerbdetails   |
| $\Delta\sigma_{C,Imp}$    | Kerbfallklasse eines infolge einer HFH-Behandlung höhergestuften Kerbdetails   |
| $\Delta\sigma_m$          | Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln   |
| $\Delta\sigma_{mem}$      | Membranspannungsschwingbreite  |
| $\Delta\sigma_{m,AW,zug}$ | Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln der zugehörigen Versuchsserie mit unbehandeltem Nahtzustand (falls Versuchsserie mit HFH-behandeltem Nahtzustand vorhanden) |
| $\varphi$                 | Nahtanstiegswinkel   |
| $\lambda$                 | Beiwert zur Berücksichtigung der Auflagerbedingungen auf das resultierende Biegemoment infolge Winkelverzug bei axialer Beanspruchung  |
| $\sigma$                  | Spannung   |
| $\sigma_{bend}$           | Biegenormalspannung  |
| $\sigma_{DMS}$            | aus mittels Dehnungsmessstreifen gemessenen Dehnungen abgeleitete Normalspannungen   |
| $\sigma_{DMS,OK}$         | aus mittels Dehnungsmessstreifen gemessenen Dehnungen abgeleitete Normalspannungen an der Oberseite eines Versuchskörpers  |
| $\sigma_{DMS,UK}$         | aus mittels Dehnungsmessstreifen gemessenen Dehnungen abgeleitete Normalspannungen an der Unterseite eines Versuchskörpers   |
| $\sigma_{mem}$            | Membranspannung  |
| $\sigma_{min}$            | minimale Normalspannung  |
| $\sigma_{min,eff}$        | minimale Normalspannung unter Berücksichtigung von Eigenspannungen   |
| $\sigma_{max}$            | maximale Normalspannung  |
| $\sigma_{max,eff}$        | maximale Normalspannung unter Berücksichtigung von Eigenspannungen   |
| $\sigma_N$                | Nennspannung   |
| $\sigma_{NL}$             | nichtlineare Normalspannung  |
| $\sigma_{nom}$            | Nennspannung   |

---

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $\sigma_{\text{res}}$       | Eigenspannung (engl.: residual stress) |
| $\sigma_{\text{res,längs}}$ | Eigenspannungen längs zur Nahrichtung  |
| $\sigma_{\text{res,quer}}$  | Eigenspannungen quer zur Nahrichtung   |
| $\sigma_{\text{t}}$         | Kerbspannung                           |



# Abbildungsverzeichnis

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Bild 1.1:  | Anwendung des höherfrequenten Hämmerns bei geschweißten Kerbdetails und resultierende plastische Verformung im behandelten Nahtübergangsbereich ..... | 2  |
| Bild 2.1:  | Entwicklung der Streckgrenzen von Feinkornbaustählen nach [N9] .....  | 9  |
| Bild 2.2:  | Schematischer Überblick über das Herstellungsverfahren wasservergüteter Feinkorngrobleche nach [HAM00] .....  | 10 |
| Bild 2.3:  | Einsatz ultrahochfester Feinkornbaustähle sowie geschweißter Kerbdetails im Teleskopauslegerbereich eines Mobilkrans .....                            | 13 |
| Bild 2.4:  | Phasen der Rissinitiierung und Rissausbreitung während des Ermüdungsvorgangs.....   | 14 |
| Bild 2.5:  | Einfluss der Zugfestigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit bei unterschiedlicher Kerbwirkung nach <i>Maddox</i> [MAD91] .....                             | 15 |
| Bild 2.6:  | Bereiche des Rissfortschrittes nach <i>Paris</i> und <i>Erdogan</i> [PAR63].....  | 16 |
| Bild 2.7:  | Einfluss von Eigenspannungen auf das effektive Spannungsverhältnis $R_{\text{eff}}$ .....   | 18 |
| Bild 2.8:  | Einteilung von Schweißnahtnachbehandlungsmethoden hinsichtlich ihrer Wirkungsweisen .....   | 20 |
| Bild 2.9:  | Vergleich zwischen einem unbehandelten (a), geschliffenen (b) und WIG-behandelten (c) Schweißnahtübergang einer Kehlnaht [LIE08] .....                | 21 |
| Bild 2.10: | Anwendung des Hämmerns (a) und resultierende Behandlungsspur (b) bei einer Kehlnaht [HAA13] .....   | 21 |
| Bild 2.11: | Einfluss verschiedener Nachbehandlungsmethoden auf das Ermüdungsverhalten geschweißter Verbindungen nach <i>Maddox</i> [MAD91].....                   | 22 |
| Bild 2.12: | Ausrüstung (a) und Anwendung (b) des höherfrequenten Hämmerns .....   | 24 |
| Bild 2.13: | Unterschiedliche Formen der einsetzbaren Bolzenspitzen .....  | 24 |
| Bild 2.14: | Plastische Eindrückung der Nahtübergangskerbe infolge höherfrequenten Hämmerns .....  | 25 |
| Bild 2.15: | Aufsicht (a), Mikroschliff (b) [MAD07] und Entstehung (c) [STA06] eines Mikrorisses in einer HFH-Behandlungsspur .....                                | 26 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Bild 2.16: | Erzeugung einer linienförmigen Behandlungsspur (a) und Kontrolle der infolge der induzierten Druckeigenstressungen resultierenden Probenwölbung (b) [N14] .....                | 28 |
| Bild 2.17: | Positionierung eines HFH-Gerätes während der Behandlung.....   | 30 |
| Bild 2.18: | Visuelle Kontrolle der Behandlungsqualität mit Hilfe einer Lupe (a) und der Spurtiefe mit Hilfe einer Tiefenmesslehre (b) .....  | 31 |
| Bild 2.19: | Definition von Nenn-, Struktur- und Kerbspannungen nach <i>Hobbacher</i> [HOB16].....  | 35 |
| Bild 2.20: | Bemessungswöhlerlinien für mittels Hämmern nachbehandelte geschweißte Kerbdetails nach <i>Haagensen</i> und <i>Maddox</i> [HAA13] .....  | 37 |
| Bild 2.21: | Bemessungswöhlerlinien für das mittels HFH nachbehandelte Kerbdetail der aufgeschweißten Quersteife nach <i>Dürr</i> [DÜR07] .....   | 40 |
| Bild 2.22: | Bemessungswöhlerlinien für das mittels HFH nachbehandelte geschweißte Kerbdetails und Stahlsorten mit $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ aus dem <i>REFRESH</i> -Projekt [UMM11] ..... | 42 |
| Bild 2.23: | Bemessungswöhlerlinien für mittels HFH nachbehandelte geschweißte Kerbdetails und Stahlsorten mit $f_y \leq 355 \text{ N/mm}^2$ nach <i>Yildirim</i> [YIL13b] .....            | 44 |
| Bild 2.24: | Kerbfallklassen für die mittels HFH nachbehandelten Kerbdetails Lamelle, Quersteife und Längssteife .....  | 46 |
| Bild 2.25: | Kerbfallklassen für das mittels HFH nachbehandelte Kerbdetail Stumpfstoß .....   | 47 |
| Bild 3.1:  | Bestimmung des charakteristischen Wertes der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ für jede Versuchsserie (a) sowie für eine serienübergreifende Grundgesamtheit (b).....       | 53 |
| Bild 3.2:  | Auswertung der Wöhlerlinienneigung $m$ für das Kerbdetail Quersteife (FAT 80).....   | 58 |
| Bild 3.3:  | Auswertung der Wöhlerlinienneigung $m$ für das Kerbdetail Längssteife (FAT 56).....  | 58 |
| Bild 3.4:  | Auswertung der Wöhlerlinienneigung $m$ für das Kerbdetail Lamelle (FAT 56).....  | 59 |
| Bild 3.5:  | Auswertung der Wöhlerlinienneigung $m$ für das Kerbdetail einseitig durchgeschweißter Stumpfstoß (FAT 71).....   | 59 |
| Bild 3.6:  | Auswertung der Wöhlerlinienneigung $m$ für das Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß mit Blechdickensprung (FAT 51).....   | 59 |
| Bild 3.7:  | Auswertung der Wöhlerlinienneigung $m$ für das Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß (FAT 90) .....  | 60 |
| Bild 3.8:  | Auswertung der Wöhlerlinienneigung $m$ für das Kerbdetail Grundwerkstoffkerbe (FAT 160).....   | 60 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Bild 3.9:  | Auswertung der <i>Wöhler</i> linienneigung $m$ für alle betrachteten Kerbdetails.....  | 62 |
| Bild 3.10: | Auswertung der Standardabweichung $s$ ( $\log N$ ) der einzelnen Versuchsserie aller betrachteten Kerbdetails für die Nahtzustände unbehandelt (a) und HFH-behandelt (b) ..... | 63 |
| Bild 3.11: | Einfluss der Streckgrenze für das Kerbdetail Quersteife (FAT 80) .....   | 65 |
| Bild 3.12: | Einfluss der Streckgrenze für das Kerbdetail Längssteife (FAT 56).....   | 66 |
| Bild 3.13: | Einfluss der Streckgrenze für das Kerbdetail Lamelle (FAT 56) .....  | 67 |
| Bild 3.14: | Einfluss der Streckgrenze für das Kerbdetail einseitig durchgeschweißter Stumpfstoß (FAT 71) .....   | 67 |
| Bild 3.15: | Einfluss der Streckgrenze für das Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß (FAT 90) .....   | 68 |
| Bild 3.16: | Einfluss der Streckgrenze für das Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß mit Blechdickensprung (FAT 51) .....   | 68 |
| Bild 3.17: | Einfluss der Streckgrenze für das Kerbdetail Grundwerkstoffkerbe (FAT 160).....  | 69 |
| Bild 3.18: | Auswertung des Streckgrenzeinflusses für alle betrachteten Kerbdetails.....  | 69 |
| Bild 3.19: | Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit infolge HFH-Behandlung für die Kerbdetails Quer-, Längssteife und Stumpfstoß (DV-Naht) .....  | 71 |
| Bild 3.20: | Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit infolge HFH für alle betrachteten Kerbdetails .....   | 73 |
| Bild 3.21: | <i>Wöhler</i> diagramm vorhandener Ergebnisse für das Kerbdetail Quersteife (FAT 80) .....   | 77 |
| Bild 3.22: | <i>Wöhler</i> diagramm vorhandener Ergebnisse für das Kerbdetail Längssteife (FAT 56) .....  | 78 |
| Bild 3.23: | <i>Wöhler</i> diagramm vorhandener Ergebnisse für das Kerbdetail Lamelle (FAT 56) .....  | 79 |
| Bild 3.24: | <i>Wöhler</i> diagramm vorhandener Ergebnisse für das Kerbdetail einseitig durchgeschweißter Stumpfstoß (FAT 71) .....   | 80 |
| Bild 3.25: | <i>Wöhler</i> diagramm vorhandener Ergebnisse für das Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß (FAT 90).....  | 81 |
| Bild 3.26: | <i>Wöhler</i> diagramm vorhandener Ergebnisse für das Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß mit Blechdickensprung (FAT 51).....  | 82 |
| Bild 3.27: | <i>Wöhler</i> diagramm vorhandener Ergebnisse für das Kerbdetail Grundwerkstoffkerbe (FAT 160) .....   | 82 |
| Bild 3.28: | Schematischer Vergleich von <i>Wöhler</i> linien unbehandelter und HFH-behandelter Kerbdetails .....   | 83 |
| Bild 4.1:  | Abmessungen der Versuchskörper für das Kerbdetail "Quersteife" .....   | 90 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Bild 4.2:  | Abmessungen der Versuchskörper für das Kerbdetail „durchlaufende Quersteife“ .....  | 90  |
| Bild 4.3:  | Abmessungen der Versuchskörper für das Kerbdetail „Längssteife“ .....   | 91  |
| Bild 4.4:  | Abmessungen der Versuchskörper für das Kerbdetail „Lamelle“ .....   | 91  |
| Bild 4.5:  | Abmessungen der Versuchskörper für das Kerbdetail „Stumpfstoß“ (V-Naht).....  | 92  |
| Bild 4.6:  | Abmessungen der Versuchskörper für das Kerbdetail „Stumpfstoß mit Blechdickensprung“ (Wurzelseite bündig, Wurzellage ausgeräumt, mit Gegenlage)“ .....  | 92  |
| Bild 4.7:  | Schweißnahtausführung (a) und Makroschliff (b) für das Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung .....  | 93  |
| Bild 4.8:  | Makroschliffbild sowie zugehörige Mikroschliffbilder für das Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung, S1100, Serie S11-6-S.....                     | 94  |
| Bild 4.9:  | Vermessung der Nahtgeometrie am Beispiel des Stumpfstoßes mit Blechdickensprung .....   | 97  |
| Bild 4.10: | Messung des Winkelverzugs $\beta_{AW}$ für die verschiedenen Kerbdetails.....   | 97  |
| Bild 4.11: | Nachbehandlung der Versuchskörper mittels höherfrequentem Hämmern .....   | 99  |
| Bild 4.12: | Draufsicht der Behandlungsbereiche der verschiedenen Kerbdetails .....  | 100 |
| Bild 4.13: | Vergleich der Nahtübergangskerben zwischen unbehandeltem (a) und HFH-behandeltem (b) Zustand.....   | 100 |
| Bild 4.14: | HFH-behandelte Nahtübergangskerben mit resultierenden plastischen Eindrückungen für das Kerbdetail Längssteife .....                                    | 101 |
| Bild 4.15: | Übergelaufenes Schweißgut (a) und flächige HFH-Behandlung (b, c) .....  | 101 |
| Bild 4.16: | Messung der Tiefe der Behandlungsspur $e$ infolge einer HFH-Behandlung .....  | 102 |
| Bild 4.17: | Spannungs-Dehnungs-Kurven der eingesetzten Grundwerkstoffe .....  | 104 |
| Bild 4.18: | Gefügestruktur im Mikroschliff am Beispiel WELDOX 1100 E ( $t = 6$ mm).....   | 105 |
| Bild 4.19: | Einbau eines Versuchskörpers in die Prüfmaschine (a) und sinusförmiges einstufiges Spannungskollektiv zur Ermittlung einer <i>Wöhlerlinie</i> (b) ..... | 107 |
| Bild 4.20: | Bruchflächen von zwei unbehandelten Versuchskörpern des Kerbdetails Quersteife, S1100 .....   | 108 |
| Bild 4.21: | Bruchbilder und -flächen von zwei HFH-behandelten Versuchskörpern des Kerbdetails Quersteife, S1100.....  | 110 |
| Bild 4.22: | Bruchbilder und -flächen von zwei HFH-behandelten Versuchskörpern des Kerbdetails Längssteife, S1100 .....  | 110 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Bild 4.23: | Bruchbilder und -flächen von zwei HFH-behandelten Versuchskörpern des Kerbdetails Lamelle, S1100 .....   | 111 |
| Bild 4.24: | Bruchbilder und -flächen von zwei HFH-behandelten Versuchskörpern des Kerbdetails Stumpfstoß mit Blechdickensprung, S1100 .....  | 111 |
| Bild 4.25: | Vergleich der Bruchlastwechselzahlen $N_f$ für den unbehandelten und HFH-behandelten Nahtzustand .....   | 112 |
| Bild 4.26: | <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Quersteife, S1100, Blechdicke 6 mm .....  | 116 |
| Bild 4.27: | <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Quersteife .....  | 116 |
| Bild 4.28: | Auf die Ergebnisse der jeweiligen Versuchsreihe des unbehandelten Nahtzustands $\Delta\sigma_{m,AW,zug}$ normiertes <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Quersteife .....  | 118 |
| Bild 4.29: | <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Längssteife .....   | 119 |
| Bild 4.30: | Auf die Ergebnisse der jeweiligen Versuchsreihe des unbehandelten Nahtzustands $\Delta\sigma_{m,AW,zug}$ normiertes <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Längssteife ..... | 120 |
| Bild 4.31: | <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Lamelle .....   | 122 |
| Bild 4.32: | Auf die Ergebnisse der jeweiligen Versuchsreihe des unbehandelten Nahtzustands $\Delta\sigma_{m,AW,zug}$ normiertes <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Lamelle .....     | 122 |
| Bild 4.33: | <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Stumpfstoß, S960, Blechdicke 7,5 mm .....   | 124 |
| Bild 4.34: | <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung, S1100, Blechdicke 6 / 8 mm, reduzierter Winkelverzug $\beta$ .....                                  | 127 |
| Bild 4.35: | <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung, S1100, Blechdicke 6 / 8 mm, reduzierter und erhöhter Winkelverzug (WV) $\beta$ .....                | 127 |
| Bild 4.36: | Auf die Ergebnisse der jeweiligen Versuchsreihe des unbehandelten Nahtzustands $\Delta\sigma_{m,AW,zug}$ normiertes <i>Wöhlerdiagramm</i> für das Kerbdetail Stumpfstoß .....  | 128 |
| Bild 4.37: | Plastische Eindrückungen im angrenzenden Grundmaterial („Ausrutscher“) .....   | 129 |
| Bild 4.38: | Vergleich zwischen den mittleren Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_m$ und den jeweils zugehörigen Kerbfallklassen entsprechend DIN EN 1993-1-9 [N1] und IIV [HOB16] .....    | 131 |
| Bild 5.1:  | Unterteilung des Beanspruchungszustands an der Nahtübergangskerbe in unterschiedliche Normalspannungen $\sigma$ .....  | 136 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Bild 5.2:  | Schematischer Ablauf eines Ermüdungsversuchs und resultierende Nennnormalspannungsverteilung an der Nahtübergangskerbe.....   | 136 |
| Bild 5.3:  | Abgrenzung von planmäßigem Axialversatz $e_p$ und Imperfektion $e$ für das Kerbdetail des Stumpfstoßes mit Blechdickensprung .....  | 138 |
| Bild 5.4:  | Einfluss des Einspannprozesses in die Spannbacken der Prüfmaschine auf die Verformungsfigur (a) und die Biegenormalspannung an der Deckseite (b) für das Kerbdetail des Stumpfstoßes ohne (oben) und mit (unten) Blechdickensprung..... | 139 |
| Bild 5.5:  | Einfluss des Axialversatzes $e$ und Blechdickenverhältnisses $t_1 / t_2$ auf die Biegenormalspannung infolge Einbau in die Prüfmaschine $\sigma_{toe,bending}$ (a) sowie den Spannungsvergrößerungsfaktor $k_{m,axial}$ (b) .....       | 140 |
| Bild 5.6:  | Definition von Systemlängen eines Versuchskörpers mit Winkelverzug.....   | 141 |
| Bild 5.7:  | Einfluss des Einspannprozesses in die Spannbacken der Prüfmaschine auf die Imperfektion $f$ am Ort des Nahtübergangs.....   | 142 |
| Bild 5.8:  | Korrelation zwischen Winkelverzug $\beta$ und Biegenormalspannung $\sigma_{bend}$ infolge Einbau in Prüfmaschine .....  | 144 |
| Bild 5.9:  | Einfluss unterschiedlich gekrümmter Oberflächen auf den Spannungsvergrößerungsfaktor $k_{m,ang}$ und Korrekturfaktor $h$ .....  | 146 |
| Bild 5.10: | Korrelation zwischen Normalspannung $\sigma_{mem,max}$ und Korrekturfaktor $h$ für die einzelnen Versuchsserien mit unterschiedlich hohen Schlankheitsgraden $L_S / t$ .....  | 147 |
| Bild 5.11: | Vergleich zwischen analytisch bestimmter Spannung (mit $k_m$ ) und mittels Dehnungsmessstreifen gemessener Spannung .....   | 149 |
| Bild 5.12: | Lagerungsbedingungen (a) und Definition der Parameter der lokalen Nahtgeometrie (b) für das Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung .....   | 150 |
| Bild 5.13: | Einfluss von Ansatzfunktion und Elementgröße auf das Konvergenzverhalten an der Nahtübergangskerbe .....  | 151 |
| Bild 5.14: | Einfluss der Nahthöhe $h_D / b_D$ (a) sowie des Nahtanstiegswinkels $\varphi$ (b) auf den Kerbfaktor $K_t$ .....  | 152 |
| Bild 5.15: | Korrelation zwischen Streuparameter der Versuchsergebnisse und Spannungsvergrößerungsfaktor infolge Winkelverzug für die Kerbdetails Quer-, Längssteife und Lamelle .....   | 156 |
| Bild 5.16: | Korrelation zwischen Streuparameter der Versuchsergebnisse und Spannungsvergrößerungsfaktor für das Kerbdetail Stumpfstoß.....  | 157 |
| Bild 5.17: | Korrelation zwischen Streuparameter der Versuchsergebnisse und Spannungsvergrößerungsfaktor für das Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung .....   | 158 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Bild 5.18: | Korrelation zwischen effektivem Spannungsverhältnis $R_{\text{eff}}$ und dem Spannungsvergrößerungsfaktor $k_{\text{m,eff}}$ sowie dem Streuparameter der Versuchsergebnisse .....   | 159 |
| Bild 5.19: | <i>Wöhler</i> diagramme unter Berücksichtigung der Membranspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{mem}}$ (links) und der korrigierten Nennspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{nom}}$ (rechts) für die Kerbdetails Quer-, Längssteife und Lamelle .....   | 162 |
| Bild 5.20: | <i>Wöhler</i> diagramme unter Berücksichtigung der Membranspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{mem}}$ (links) und der korrigierten Nennspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{nom}}$ (rechts) für die Kerbdetails Stumpfstoß ohne und mit Blechdickensprung .....                              | 163 |
| Bild 5.21: | Vergleich der Standardabweichungen $s$ ( $\log N$ ) jeder Versuchsserie unter Berücksichtigung der Membranspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{mem}}$ und der korrigierten Nennspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{nom}}$ .....   | 164 |
| Bild 5.22: | Vergleich der Standardabweichungen $s$ ( $\log N$ ) der serienübergreifenden Auswertung für jedes Kerbdetails und jeden Nahtzustand unter Berücksichtigung der Membranspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{mem}}$ und der korrigierten Nennspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{nom}}$ ..... | 165 |
| Bild 5.23: | Vergleich der mittleren Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{\text{m}}$ unter Berücksichtigung der Membranspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{mem}}$ und der korrigierten Nennspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{\text{nom}}$ .....   | 166 |
| Bild 6.1:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail Quersteife im unbehandelten Nahtzustand .....  | 172 |
| Bild 6.2:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail Längssteife im unbehandelten Nahtzustand .....   | 172 |
| Bild 6.3:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail Lamelle im unbehandelten Nahtzustand .....   | 173 |
| Bild 6.4:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail einseitig durchgeschweißter Stumpfstoß im unbehandelten Nahtzustand .....  | 173 |
| Bild 6.5:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß mit Blechdickensprung im unbehandelten Nahtzustand .....  | 174 |
| Bild 6.6:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse für das Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung mit vorhandenen Ergebnissen   |     |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
|            | aus der Literatur für das Kerbdetail Stumpfstoß mit dokumentierten Imperfektionen .....   | 175 |
| Bild 6.7:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail Quersteife im HFH-behandelten Nahtzustand.....  | 181 |
| Bild 6.8:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail Längssteife im HFH-behandelten Nahtzustand.....   | 182 |
| Bild 6.9:  | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail Lamelle im HFH-behandelten Nahtzustand .....  | 182 |
| Bild 6.10: | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail einseitig durchgeschweißter Stumpfstoß im HFH-behandelten Nahtzustand.....  | 183 |
| Bild 6.11: | Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur für das Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß mit Blechdickensprung im HFH-behandelten Nahtzustand .....   | 183 |
| Bild 7.1:  | Einfluss der Streckgrenze für die beiden Kerbdetails Quer- und Längssteife im unbehandelten (a) und HFH-behandelten (b) Nahtzustand .....   | 186 |
| Bild 7.2:  | Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit infolge HFH-Behandlung .....   | 188 |
| Bild 7.3:  | Vergleich der vorgeschlagenen Kerbfallklassen und der aus den Versuchen resultierenden, charakteristischen Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_C$ für den HFH-behandelten Nahtzustand ...   | 193 |
| Bild 7.4:  | Einordnung der eigenen Versuchsergebnisse für den HFH-behandelten Nahtzustand in die vorgeschlagenen Kerbfallklassen $\Delta\sigma_{C,imp}$ .....   | 194 |
| Bild 7.5:  | Einfluss des Spannungsverhältnisses $R$ auf den Korrekturfaktor $f$ ( $R$ ) (a) und die Reduzierung der Kerbfallklassen $k_{FAT,R}$ (b) .....   | 195 |
| Bild 7.6:  | Rechnerische Lebensdauererlängerungen infolge einer HFH-Behandlung für Beanspruchungsniveaus mit korrespondierenden Lebensdauern in Höhe von $N_{EC3} = 10.000$ und $N_{EC3} = 40.000$ für den unbehandelten Nahtzustand entsprechend der Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9 [N1] ..... | 201 |
| Bild C.1:  | XABO 960, $t = 7,5$ mm: Spannungs-Dehnungs-Kurve .....  | 253 |
| Bild C.2:  | XABO 1100, $t = 6$ mm: Spannungs-Dehnungs-Kurve .....   | 253 |
| Bild C.3:  | WELDOX 1100, $t = 6$ mm: Spannungs-Dehnungs-Kurve.....  | 254 |
| Bild C.4:  | WELDOX 1300, $t = 4$ mm: Spannungs-Dehnungs-Kurve.....  | 254 |
| Bild C.5:  | Spannungs-Dehnungs-Kurven der eingesetzten Grundwerkstoffe .....  | 255 |
| Bild C.6:  | XABO 1100, $t = 6$ mm: Mikroschliffbilder.....  | 256 |

---

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Bild C.7:  | XABO 1100, $t = 8$ mm: Mikroschliffbilder .....     | 257 |
| Bild C.8:  | WELDOX 1100, $t = 6$ mm: Mikroschliffbilder.....    | 258 |
| Bild C.9:  | WELDOX 1100, $t = 8$ mm: Mikroschliffbilder.....    | 259 |
| Bild C.10: | WELDOX 1300, $t = 4$ mm: Mikroschliffbilder.....    | 260 |
| Bild D.1:  | Union X90: Spannungs-Dehnungs-Kurve .....           | 263 |
| Bild D.2:  | Makro- und Mikroschliffbilder, Serie 96-7-La .....  | 264 |
| Bild D.3:  | Makro- und Mikroschliffbilder, Serie 11-6-QS .....  | 265 |
| Bild D.4:  | Makro- und Mikroschliffbilder, Serie 11-6-QSd ..... | 266 |
| Bild D.5:  | Makro- und Mikroschliffbilder, Serie 96-7-S .....   | 267 |
| Bild D.6:  | Makro- und Mikroschliffbilder, Serie S11-6-S.....   | 268 |
| Bild D.7:  | Makro- und Mikroschliffbilder, Serie 11-6-S .....   | 269 |



## Tabellenverzeichnis

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Tabelle 2.1: | Typische mechanische Eigenschaften wasservergüteter, ultrahochfester Feinkornbaustähle .....   | 11 |
| Tabelle 2.2: | Anforderungen an geometrische Oberflächenunregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 5817 [N13] .....   | 27 |
| Tabelle 2.3: | Mögliche Behandlungsparameter für verschiedene HFH-Geräte .....  | 29 |
| Tabelle 2.4: | Höherstufung der Bezugskerbfallklasse zur Berücksichtigung einer Hämmer-Behandlung nach <i>Haagensen</i> und <i>Maddox</i> [HAA13] .....                           | 37 |
| Tabelle 2.5: | Verbesserungsfaktoren zur Berücksichtigung einer HFH-Behandlung nach <i>Dürr</i> [DÜR07] .....   | 39 |
| Tabelle 2.6: | Verbesserungsfaktoren zur Berücksichtigung einer HFH-Behandlung aus dem <i>REFRESH</i> -Projekt [UMM11] .....  | 41 |
| Tabelle 2.7: | Höherstufung der Bezugskerbfallklasse infolge einer HFH-Behandlung nach <i>Yildirim</i> [YIL13b] .....   | 43 |
| Tabelle 2.8: | Vergleich der verschiedenen Bemessungsansätze zur Berücksichtigung von HFH .....   | 45 |
| Tabelle 3.1: | Parameter der berücksichtigten Versuchsreihen aus der Literatur .....  | 51 |
| Tabelle 3.2: | Einordnung der betrachteten Kerbdetails im unbehandelten Nahtzustand in Kerbfallklassen entsprechend DIN EN 1993-1-9 [N1] sowie den IIW Empfehlungen [HOB16] ..... | 54 |
| Tabelle 3.3: | Aus den Kerbfallklassen gemäß DIN EN 1993-1-9 [N1] und den IIW Empfehlungen [HOB16] abgeleitete Mittelwerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_m$ .....         | 55 |
| Tabelle 3.4: | Auswertung der <i>Wöhler</i> linienneigung $m$ der betrachteten Kerbdetails und Nahtzustände .....   | 61 |
| Tabelle 3.5: | Auswertung der Standardabweichung $s$ ( $\log N$ ) der betrachteten Kerbdetails und Nahtzustände .....   | 63 |
| Tabelle 3.6: | Auswertung des Streckgrenzeinflusses der betrachteten Kerbdetails und Nahtzustände .....   | 70 |
| Tabelle 3.7: | Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit infolge HFH in Abhängigkeit der Streckgrenze .....  | 72 |
| Tabelle 3.8: | Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit infolge HFH in Abhängigkeit von Auswertungsmethode und Streckgrenze .....   | 74 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 4.1:  | Überblick der Ermüdungsversuche .....  | 88  |
| Tabelle 4.2:  | Anforderungen an die vermessenen, geometrischen<br>Oberflächenunregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 5817 [N13] .....  | 95  |
| Tabelle 4.3:  | Ergebnisse der gemessenen Unregelmäßigkeiten der Kehlnähte<br>und Einordnung in Bewertungsgruppen nach DIN EN ISO 5817<br>[N13] .....                            | 96  |
| Tabelle 4.4:  | Ergebnisse der gemessenen Unregelmäßigkeiten der<br>Stumpfnähte und Einordnung in Bewertungsgruppen nach DIN<br>EN ISO 5817 [N13] .....                          | 96  |
| Tabelle 4.5:  | Statistische Auswertung der nach dem Schweißen gemessenen<br>Winkelverzüge $\beta_{AW}$ aller untersuchten Versuchsreihen .....                                  | 98  |
| Tabelle 4.6:  | Parameter der Schweißnahtnachbehandlung mittels<br>Höherfrequentem Hämmern .....   | 99  |
| Tabelle 4.7:  | Statistische Auswertung der nach der HFH-Behandlung<br>gemessenen Eindrücktiefe $e_{PWT}$ für das Kerbdetail Stumpfstoß<br>mit Blechdickensprung .....           | 102 |
| Tabelle 4.8:  | Mittelwerte der gemessenen Winkelverzüge nach dem<br>Schweißen $\beta_{AW}$ sowie nach der anschließenden HFH-<br>Behandlung $\beta_{HFH}$ .....                 | 103 |
| Tabelle 4.9:  | Mechanische Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe .....  | 104 |
| Tabelle 4.10: | Ergebnisse der röntgenographischen<br>Eigenspannungsmessungen .....  | 105 |
| Tabelle 4.11: | Rissausgangsorte der HFH-behandelten Versuchskörper .....  | 109 |
| Tabelle 4.12: | Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche für das<br>Kerbdetail Quersteife .....   | 117 |
| Tabelle 4.13: | Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche für das<br>Kerbdetail Längssteife .....  | 120 |
| Tabelle 4.14: | Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche für das<br>Kerbdetail Lamelle .....  | 123 |
| Tabelle 4.15: | Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche für das<br>Kerbdetail Stumpfstoß, S960, Blechdicke 7,5 mm .....  | 124 |
| Tabelle 4.16: | Statistische Auswertung der Ermüdungsversuche für das<br>Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung, S1100,<br>Blechdicke 6 / 8 mm .....                        | 126 |
| Tabelle 4.17: | Statistische Auswertung aller Ermüdungsversuche .....  | 130 |
| Tabelle 5.1:  | Vergleich zwischen der Berechnung des<br>Spannungsvergrößerungsfaktors $k_{m,axial}$ nach DIN EN 1993-1-9<br>[N1], IIW [HOB16] und der analytischen Lösung ..... | 140 |
| Tabelle 5.2:  | Systemlängen sowie Verschiebungen an der<br>Nahtübergangskerbe infolge des Einspannprozesses .....   | 143 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 5.3:  | Statistische Auswertung der mit den gemessenen Nahtgeometrieparametern ermittelten Kerbfaktoren $K_t$ .....   | 153 |
| Tabelle 5.4:  | Mittlere Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{m,mem}$ jedes Kerbdetails und Nahtzustands .....  | 154 |
| Tabelle 6.1:  | Vergleich der mittleren Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_m$ für den unbehandelten Nahtzustand aus den Kerbfallklassen gemäß DIN EN 1993-1-9 [N1], vorhandenen Literaturergebnissen und den eigenen Ermüdungsversuchen .....      | 170 |
| Tabelle 6.2:  | Anwendung verschiedener Bemessungsansätze zur Berücksichtigung von HFH auf die untersuchten Kerbdetails .....   | 176 |
| Tabelle 6.3:  | Vergleich der mittleren Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_m$ für den HFH-behandelten Nahtzustand aus den Kerbfallklassen nach <i>Yildirim</i> [YIL13b], vorhandenen Literaturergebnissen und den eigenen Ermüdungsversuchen ..... | 178 |
| Tabelle 7.1:  | Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit infolge HFH in Abhängigkeit der Streckgrenze .....   | 189 |
| Tabelle 7.2:  | Ableitung der Kerbfallklassenerhöhung $k_{FAT}$ auf Basis der Ergebnisse der Regressionsanalyse .....   | 189 |
| Tabelle 7.3:  | Ableitung von Kerbfallklassen auf Basis der mittleren Ermüdungsfestigkeiten der eigenen Versuche .....  | 190 |
| Tabelle 7.4:  | Vergleich der Berechnung der Kerbfallklassenerhöhung $k_{FAT}$ für unterschiedliche Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma$ .....  | 192 |
| Tabelle 7.5:  | Einfluss des Spannungsverhältnisses $R$ auf die Verringerung der Kerbfallklasse für einen HFH-behandelten Nahtübergang nach <i>Yildirim</i> [YIL13b] .....  | 196 |
| Tabelle 7.6:  | Begrenzung zulässiger Spannungen entsprechend der verschiedenen Bemessungsansätze zur Berücksichtigung von HFH .....  | 199 |
| Tabelle 7.7:  | Vergleich der vorgeschlagenen Kerbfallklassen für den HFH-behandelten Nahtzustand mit den Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9 [N1] für den unbehandelten Nahtzustand .....   | 200 |
| Tabelle 7.8:  | Randbedingungen für die Gültigkeit der vorgeschlagenen Kerbfallklassen .....  | 200 |
| Tabelle 7.9:  | Vergleich der vorgeschlagenen Kerbfallklassen für den HFH-behandelten Nahtzustand mit den Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9 [N1] für den unbehandelten Nahtzustand .....   | 204 |
| Tabelle 7.10: | Randbedingungen für die Gültigkeit der vorgeschlagenen Kerbfallklassen .....  | 204 |
| Tabelle 8.1:  | Vergleich der vorgeschlagenen Kerbfallklassen für den HFH-behandelten Nahtzustand mit den Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9 [N1] für den unbehandelten Nahtzustand .....   | 208 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 8.2:  | Randbedingungen für die Gültigkeit der vorgeschlagenen Kerbfallklassen .....  | 208 |
| Tabelle B.1:  | Betrachtete Untersuchungen zum Kerbdetail Quersteife (FAT 80).....  | 232 |
| Tabelle B.1:  | Betrachtete Untersuchungen zum Kerbdetail Quersteife (FAT 80) (Fortsetzung) .....   | 233 |
| Tabelle B.2:  | Betrachtete Untersuchungen zum HFH-behandelten Kerbdetail Quersteife (FAT 80) .....   | 234 |
| Tabelle B.3:  | Betrachtete Untersuchungen zum Kerbdetail Längssteife (FAT 56).....   | 235 |
| Tabelle B.4:  | Betrachtete Untersuchungen zum HFH-behandelten Kerbdetail Längssteife (FAT 56) .....  | 236 |
| Tabelle B.5:  | Betrachtete Untersuchungen zum HFH-behandelten Kerbdetail Längssteife (FAT 56) (Fortsetzung) .....  | 237 |
| Tabelle B.6:  | Betrachtete Untersuchungen zum Kerbdetail Lamelle (FAT 56).....   | 238 |
| Tabelle B.7:  | Betrachtete Untersuchungen zum HFH-behandelten Kerbdetail Lamelle (FAT 56) .....  | 239 |
| Tabelle B.8:  | Betrachtete Untersuchungen zum Kerbdetail einseitig durchgeschweißter Stumpfstoß (FAT 71) .....   | 240 |
| Tabelle B.9:  | Betrachtete Untersuchungen zum HFH-behandelten Kerbdetail einseitig durchgeschweißter Stumpfstoß (FAT 71) .....   | 241 |
| Tabelle B.10: | Betrachtete Untersuchungen zum Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß (FAT 90) .....   | 242 |
| Tabelle B.11: | Betrachtete Untersuchungen zum HFH-behandelten Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß (FAT 90) .....   | 243 |
| Tabelle B.12: | Betrachtete Untersuchungen zum Kerbdetail beidseitig geschweißter Stumpfstoß mit Blechdickensprung (FAT 51) .....   | 244 |
| Tabelle B.13: | Betrachtete Untersuchungen zum Kerbdetail Grundwerkstoffkerbe (FAT 160) .....   | 245 |
| Tabelle C.1:  | Chemische Zusammensetzung der verwendeten Stahlsorten entsprechend den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 und den max. Grenzwerten aus den jeweiligen Werkstoffblättern.....   | 251 |
| Tabelle C.2:  | Mechanisch-technologische Eigenschaften der verwendeten Stahlsorten entsprechend den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 und den vom Hersteller direkt mitgeteilten Prüfwerten sowie Ergebnisse eigener Zugversuche ..... | 252 |
| Tabelle D.1:  | Protokolle der durchgeführten Schweißarbeiten, Stahlsorten S960 und S1100 (Kehlnähte).....  | 261 |
| Tabelle D.2:  | Protokolle der durchgeführten Schweißarbeiten, Stahlsorten S1100 (Stumpfnähte) und S1300 .....  | 262 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle D.3: Mechanisch-technologische Eigenschaften des verwendeten<br>Schweißzusatz-werkstoffes ..... | 263 |
| Tabelle E.1: Übersicht aller geprüften Versuchsserien.....  | 272 |
| Tabelle E.2: Ergebnisse der Ermüdungsversuche .....   | 273 |
| Tabelle E.2: Ergebnisse der Ermüdungsversuche (Fortsetzung) .....                                       | 274 |
| Tabelle E.2: Ergebnisse der Ermüdungsversuche (Fortsetzung) .....                                       | 275 |
| Tabelle E.2: Ergebnisse der Ermüdungsversuche (Fortsetzung) .....                                       | 276 |
| Tabelle E.2: Ergebnisse der Ermüdungsversuche (Fortsetzung) .....                                       | 277 |