

Adaptierte Wärmeführung zur Optimierung schweißbedingter Beanspruchungen und Eigenschaften höherfester Verbindungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Dirk Schröpfer

geb. am 11.07.1981 in Erfurt

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Kannengießer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Promotionskolloquium am 30. Mai 2017

Berichte aus der Werkstofftechnik

Dirk Schröpfer

**Adaptierte Wärmeführung zur Optimierung
schweißbedingter Beanspruchungen und
Eigenschaften höherfester Verbindungen**

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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2017

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 978-3-8440-5406-4

ISSN 0945-1056

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

In Gedenken an meinen lieben Opa Klaus Siecora († 25.10.2011)

Kurzfassung

Der derzeitige Trend, Konstruktionen immer leichter zu gestalten, führt im modernen Stahlbau zu einer zunehmenden Relevanz höherfester Feinkornbaustähle mit Streckgrenzen ab 690 MPa. Daher bieten Hersteller Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe dieser Güten mit guter Schweißbarkeit an. Bei der Fertigung von Baumaschinen wie Mobilkränen werden diese Werkstoffe bereits seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Jüngst weitet sich die Verwendung auch auf andere Bereiche des Stahlbaus wie dem Brücken- oder Windenergieanlagenbau aus. Jedoch lässt sich nach aktuellem Stand der Normen das Festigkeitspotential dieser höherfesten Stähle oft noch nicht wirtschaftlich effizient und vollständig ausnutzen. Denn mit zunehmender Festigkeit geschweißter Verbindungen sind engere Verfahrensgrenzen sowie angehobene Tragfähigkeits- und Sicherheitsanforderungen verbunden. Eigenspannungen in geschweißten Bauteilen sind dabei maßgeblich, weil diese die Beanspruchbarkeit und Bauteilperformance insbesondere infolge der geringen plastischen Dehnungsreserven höherfester Feinkornbaustähle beeinflussen. Die Eigenspannungsbildung ist wesentlich vom Werkstoff, dem Schweißprozess und der Konstruktion sowie deren Interaktion abhängig. Bei normgemäßer schweißtechnischer Fertigung und Konstruktionsauslegung wird in der Regel pauschal von Eigenspannungen in Höhe der Streckgrenze ausgegangen. Die Regelwerke und Richtlinien beruhen jedoch auf Annahmen, die vorwiegend für niedrigfeste Stähle zutreffend sind. Zwar zeigen frühere Arbeiten, dass Eigenspannungen in höherfesten Verbindungen meist deutlich unterhalb der Streckgrenze liegen. Die Untersuchungen konzentrierten sich jedoch vornehmlich auf Einzeleinflüssen und freischumpfende Laborproben. Bisher fehlen systematische Untersuchungen an höherfesten Verbindungen, die die Steifigkeits- und Wärmeableitungsbedingungen realer Bauteile berücksichtigen. Für eine adäquate Bewertung schweißbedingter Beanspruchungen und Optimierung mithilfe adaptierter Wärmeleitung ist dies aber erforderlich. Denn globale Reaktionsspannungen infolge einer äußeren Schrumpfbegrenzung können zur deutlichen Anhebung der Gesamtbeanspruchung führen.

Im Fokus dieser Arbeit stand deshalb die Erarbeitung einer statistischen Versuchsmatrix zur Durchführung freischumpfender und definiert schrumpfbegrenzter Schweißexperimente. Dazu erfolgten systematische mehraxiale Analysen globaler Kräfte, Momente und Spannungen während des Schweißens und Abkühlens sowie lokaler Eigenspannungen in der Schweißnaht in Abhängigkeit von Wärmeleitung und eingesetztem Werkstoff. Hierfür wurden Experimente an speziellen dreidimensional wirkenden Prüfanlagen zur Abbildung wirklichkeitsnaher Einspannungsbedingungen durchgeführt. Die lokale Eigenspannungsanalyse erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Bauteile gewährleisteten numerische und experimentelle Analysen zur Steifigkeit von Bauteilstrukturen und Prüfanlagen gegenüber Quer- und Winkelschrumpfung. Ziel war die Quantifizierung der Einzeleffekte unter Berücksichtigung gegenseitiger Wechselwirkungen nach Wirkungsart bzw. -ort und auf den resultierenden Beanspruchungszustand. Nur mit diesen Kenntnissen lassen sich schweißbedingte Beanspruchungen bei der Fertigung und Konstruktion höherfester Bauteile angemessen berücksichtigen.

Für die Beanspruchungsanalysen konnten durch Einsatz anwendungsnaher Schweißverfahren und -parameter höherfeste Schweißverbindungen an zwei Blechdicken der vorwiegend eingesetzten wasservergüteten Feinkornbaustähle S690QL und S960QL realisiert werden. Die Abkühlbedingungen sowie die daraus resultierenden Gefüge und Eigenschaften wurden analysiert. Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder ließen sich mithilfe der Einsensor-Differenz-Thermoanalyse erarbeiten. Dies ermöglichte die Untersuchung des Einflusses der Legierungszusammensetzung und des Umwandlungsverhaltens der Werkstoffe auf die Eigenschaften und

Eigenspannungsbildung im Zusammenhang mit der Ermittlung einer adäquaten Wärmeführung. So zeigte sich im Gegensatz zu den Regelwerken bei den für höherfeste Güten empfohlenen hohen Abkühlraten eine günstigere Beeinflussung durch die Streckenenergie als durch die Arbeitstemperatur. Umfangreiche Analysen der auf die neutrale Faser der Schweißnaht bezogenen Kräfte und Spannungen belegten erstmals quantitativ die hohe Abhängigkeit des Reaktionsmomentes und damit der Biegespannungen von der Wärmeführung. Angehobene Arbeitstemperaturen führen zwar zu erhöhten Beanspruchungen während der Fertigung. Dem kann aber mit Schweißgütern niedrigerer Festigkeit oder angepasster Nahtkonfiguration Rechnung getragen werden. Für erhöhte Einspannbedingungen riefen abgesenkte Arbeitstemperaturen deutlich niedrigere Reaktionsmomente und -spannungen nach der Abkühlung hervor. Im Widerspruch dazu empfehlen die Regelwerke für risssicheres Schweißen von Feinkornbaustählen basierend auf Kohlenstoffäquivalentkonzepten die Einstellung einer Wärmeführung über das Anheben von Mindestarbeitstemperaturen. Diese Konzepte besitzen daher nur eingeschränkte Gültigkeit, um bei angehobenen Einspannbedingungen in höherfesten Verbindungen gezielt schweißbedingte Beanspruchungen zu reduzieren und ein erhöhtes Rissrisiko zu vermeiden. Höhere Streckenenergien führten infolge gesteigerter Abschmelzraten und einer geringeren Anzahl an Schweißlagen sowie außermittig eingebrachter Schweißraupen zur wesentlichen Absenkung der Reaktionsmomente und -spannungen. Dies unterstreicht die Bedeutung der Streckenenergie zur Einstellung adäquater Abkühlbedingungen bei höherfesten Stählen. Eine weitere deutliche Reduzierung des Gesamtbeanspruchungsniveaus war bei hohen Einspann- und Biegeeinspanngraden durch eine Verringerung des Nahtspaltes unter Verwendung einer modifizierten Sprühlichtbogenvariante möglich. Des Weiteren ergaben sich beim Einsatz von Zusatzwerkstoffen mit höherer Festigkeit in den Fülllagen aufgrund des Umwandlungsverhaltens positive Effekte auf den Kräfte- und Spannungshaushalt. Diese Erkenntnisse konnten durch die lokalen Eigenspannungsanalysen bestätigt werden. Erhöhte Biegespannungen wirken sich weniger auf das Eigenspannungsniveau im Schweißgut als vielmehr auf die benachbarten Bereiche bzw. die Wärmeeinflusszone (WEZ) aus. Annähernd unabhängig vom eingesetzten Werkstoff war ein linearer Zusammenhang zwischen Biegeeinspanngrad, Biegespannung und Höhe der Zugeigenspannungen in der WEZ zu beobachten. Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass eine Umlagerung dieser Zugeigenspannungen, bspw. durch Lasten im Betrieb, im Zusammenhang mit den geringen plastischen Dehnungsreserven der höherfesten Werkstoffe nicht stattfinden kann. Zudem bedingen die Gefüge der WEZ herabgesetzte mechanische Eigenschaften und in Kombination mit komplexen, mehrachsigen Spannungszuständen eine Minderung der Bauteilperformance und mit höherer Wahrscheinlichkeit ein frühzeitiges Bauteilversagen.

Eine zusammenfassende Effekt- und Wechselwirkungsanalyse der verschiedenen Nahtbereiche mit Regressionsmodellen war Grundlage für die Abschätzung schweißbedingter Beanspruchungen. Damit zeigt die Arbeit, dass sich unter Gewährleistung der mechanisch-technologischen Nahteigenschaften eine adaptierte Wärmeführung ermitteln lässt, um möglichst geringe Zugeigenspannungen in lastkritischen Bereichen zu erzielen. Darauf basierend erfolgte die Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung und Optimierung schweißbedingter Beanspruchungen in höherfesten Verbindungen. In Anlehnung an die Bemessungskonzepte der Betriebsfestigkeit wurden somit Berechnungsansätze zu einer nach Wirkungsart und -ort differenzierten Berücksichtigung schweißbedingter Beanspruchungen in höherfesten Konstruktionen beispielhaft für den Mobilkranbau erarbeitet. In Fallbeispielen ließ sich mit einem neuen Berechnungsansatz zeigen, dass die zur Optimierung schweißbedingter Beanspruchungen abgeschätzten Wärmeführungs- und Schweißparameter eine gesteigerte Ausnutzung der Streckgrenzen höherfester Feinkornbaustähle gegenüber dem konventionellen Tragfähigkeitsnachweis ermöglichen.

Abstract

The present trend towards lightweight design has led to an expanding relevance of high-strength fine-grained structural steels, HSLA steels, in modern steel construction. Hence, steel producers have provided numerous base and filler metals with good weldability and yields strengths equal to or greater than 690 MPa. These steels have been successfully applied in construction machines like mobile cranes for some decades. In recent years, the application of HSLA steels has increased in other fields of steel construction, e. g. bridge building and wind power plants. Following today's prevailing standards and regulations, the exploitation of high-strength steels is often not economically efficient and possible. Advancement in material strength in steels has led to high-fidelity working ranges for welding and tighter requirements regarding load capacity and safety, thereby residual stresses in welded components are relevant. The welding stress level decisively affects the load bearing capacity and performance of the welded component especially due to the low plastic strain ratio of HSLA steels. The welding loads are directly influenced by: the applied material, welding process, and design, and can be affected by a complex interaction of these. Using current standards for welding-related process and design, residual stresses are generally assumed at the level of the yield strength. However, these standards are based on assumptions, which are predominantly applicable for mild steels. Conversely, in HSLA steel welds prior works have shown that residual stresses are commonly considerably lower than the yield strength. However, these studies primarily addressed the effects separately and were basically performed in free shrinking laboratory samples. Systematic analyses in HSLA steels are lacking, especially with respect to component-relevant dimensions and conditions of restraint and heat dissipation. Regardless, these conditions have to be taken into account concerning appropriate residual stress assessments and optimization using adapted heat control and welding parameters. These considerations are necessary, since global reaction stresses occur due to external shrinkage restraints, which may cause a significant elevation of the total stresses.

The focus of this work was the elaboration of an experimental matrix by means of design of experiments (DoE) for the implementation of welding experiments under free shrinkage and defined restraint conditions. To accomplish this, systematic multi-axial analyses, dependent on different heat controls and varied applied materials were conducted. Specifically, the global and local forces, moments and stresses due to welding and subsequent cooling and the resulting local residual stresses of the welds were investigated. Therefore, investigations in special three-dimensional testing facilities were carried out, in order to reproduce realistic restraint conditions. The local residual stresses were analysed by means of X-ray diffraction in the weld seams. Numerical and experimental analyses of restraint conditions regarding lateral and angular distortion of component-relevant structures and of the testing setups were conducted. This ensured the transferability of the results to actual weld structures. The goal of these analyses was a detailed description of all influencing factors with respect to welding stresses according to type and location of each respective effect. The complex interaction of these factors and impact on the resulting stress level was quantified. This acquired knowledge enabled an appropriate consideration of welding stresses with respect to manufacturing and design of HSLA steel components.

Production relevant welding processes and parameters allowed load analyses at application-oriented welds of the representative HSLA steels, S690QL and S960QL, with two different plate thicknesses. Cooling conditions and the resulting microstructures and properties were analysed. Continuous cooling transformation diagrams for the welds were elaborated by means of single sensor differential thermal analyses. This allowed the investigation of the influence of the alloy

composition and phase transformation behaviour of the applied materials on the properties and residual stresses in order to determine of adequate heat control parameters. In contrary to the current standards, which specifies adjustment of the working temperature, it proved to be advantageous to adjust the welding process heat input to align with high cooling rates recommended for HSLA steel. Extensive analyses of the stresses and loads based on the neutral axis of the weld seam revealed significant effects of the heat control on the resulting reaction moments. Higher working temperatures caused elevated stresses and loads during the welding process, which can be taken into account by applying low-strength filler metals or by adapting seam configurations. Under increased restraint conditions, lower working temperatures significantly reduced the resulting reaction moments and stresses after cooling to ambient temperature. This is contradicted by the current standards for the welding of HSLA steels, which are based on carbon equivalent concepts. These standards recommend the compliance of minimum working temperatures to avoid cold cracks. Consequently, a limited applicability of these recommendations was found for HSLA steel welds. In particular, these heat control concepts are mostly inappropriate to reduce welding stresses under high restraint conditions and, in this context, to avoid a higher cracking risk. Higher welding heat inputs produced a distinct reduction of the reaction stresses and moments due to increased deposition rates and fewer weld beads as well as less asymmetrical inserted weld passes. This emphasizes the importance of the welding heat input as a heat control parameter for the adjustment of appropriate cooling conditions of HSLA steel welds. Another significant reduction of the bending stresses due to a high suspension of angular distortion was revealed for the weld seams with decreased groove angles in combination with the application of the modified spray arc processes. Moreover, the phase transformation behaviour of higher strength materials in the filler beads showed beneficial effects on the resulting stresses and moments. The results of local residual stress measurements confirmed the findings of the global welding stress analyses. Increased bending stresses did not largely affect the residual stress level on the weld metal surface, but caused significantly higher tensile residual stresses in the adjacent areas and the heat affected zone (HAZ) of the weld seam. A linear relation between bending restraint, bending stress and tensile stress level of the HAZ was observed as almost independent of the applied materials. It remains to be noted, that these increased tensile residual stresses have developed as a consequence of the global forces and moments. Hence, it can be assumed that a redistribution of these respective stresses, e. g. due to service loads, would then be suppressed, especially for the low plastic strain ratios of HSLA steels. In addition, the detrimental microstructures of the HAZ in association with complex multi-axial residual stress states can be expected to result in a reduced performance and premature failure of the welded component.

A concluding analysis of the effects and interactions regarding the different weld regions by means of regression models provides a basis for a welding load prediction. As a result, an adapted heat control can be identified to ensure the required mechanical properties and to, synchronously, optimize the stresses due to welding, especially in load critical areas of the weld. From the abovementioned, a concept for a residual stress assessment and optimization in welded HSLA steel structures, for example mobile crane design, was developed. Moreover, this allowed the development of engineering approaches for welding stress assessment considering the different types and locations of the respective influences according to the methods of welded component assessments of fatigue life. One of the developed engineering approaches was assessed by performing a comparative case study to measure the effectiveness with respect to HSLA steel components. The estimated heat control and welding parameters for an optimized state of welding stresses allowed an increased utilization of the yield strength of the welded component in comparison to a conventional conducted proof of strength.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Fachbereich 9.4 – „Integrität von Schweißverbindungen“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Fachbereichsleiter Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Kannengießer für die hervorragende und vielfältige Unterstützung, die engagierte Betreuung und die Übernahme des Hauptgutachtens. Danke für das Vertrauen in meine Arbeit!

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak danke ich für die Übernahme des Gutachtens und das wohlwollende Interesse an dieser Arbeit.

Ich möchte mich zudem ganz herzlich bei den Mitarbeitern/-innen der Fachbereiche 9.3 und 9.4 bedanken, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Mein herzlicher Dank gilt Dr.-Ing. Arne Kromm und Dr.-Ing. Thomas Lausch für die Einarbeitung in die Thematik und die zahlreichen hilfreichen Fachgespräche sowie kritische Durchsicht einer Vielzahl von Fachaufsätzen. Für die hervorragende Unterstützung bei den Schweißversuchen bedanke ich mich bei meinen Kollegen Andreas Hannemann, Marco Lammers, Stefan Brunow und Thomas Michael. Des Weiteren gilt mein Dank Dr.-Ing. Ping Xu für die Hilfe bei den Eigenspannungsanalysen sowie meinem Kollegen Michael Richter für die Umsetzung zahlreicher Werkstattarbeiten und den Kolleginnen Marina Marten für die Unterstützung bei der Metallographie sowie Sandy Ney für die Hilfe bei der Organisation vieler Projektausschüsse und Dienstreisen. Auch möchte ich meinem langjährigen Bürokollegen Enrico Steppan für die angenehme Zusammenarbeit und konstruktiven Diskussionen danken. Großer Dank gilt meinem Kollegen und ehemaligen Masteranden Thomas Schaupp für seine exzellente Unterstützung und meinen Doktorandenkollegen/-innen für die vielen Anregungen und die wunderbare Arbeitsatmosphäre.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen zweier AiF-Forschungsvorhaben (IGF-Nr. 17267 N, P922 und IGF-Nr. 17978 N, P1011) der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. durchgeführt. Für die finanzielle Unterstützung und die ausgezeichnete Kooperation aller im projektbegleitenden Ausschuss engagierten Mitarbeiter/-innen der beteiligten Firmen sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Hervorzuheben sind die Herren Harald Riedinger (Terex Cranes Germany GmbH), Jochen Englert (Tadano Faun Stahlbau GmbH), Dr.-Ing. Sigurd Weise (OWT Offshore Wind Technologie GmbH) und Walter Gundel sowie Frau Dr.-Ing. Gerlinde Winkel (SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH) für die fachlichen Diskussionen und Unterstützung bei den Bauteilanalysen, die Herren Dr.-Ing. Albrecht Borner (Hermann Fliess & Co. GmbH), Hermann-Josef Weber (voestalpine Böhler Welding Germany GmbH), Gösta Krauß (Palfinger Platforms GmbH), Christoph Bednarz (SSAB Swedish Steel GmbH), Jürgen Wagner und Rudolf Rauch (voestalpine Stahl GmbH) sowie Henry Wetzels (Merkle GmbH) und Heinz-Dieter Kocab (EWM AG) für die Bereitstellung von Grund- bzw. Zusatzwerkstoffen und der Schweißtechnik.

Ich möchte meiner Familie und meinen Freunden einen ganz lieben Dank aussprechen. Dieser gilt insbesondere meiner Frau Cornelia. Ich danke Dir für Deine große Geduld und perfekte Unterstützung in allen Lebenslagen. Für die stete Ermutigung und Förderung sowie für die kritische Durchsicht meiner Arbeit danke ich ebenso meinen Eltern Egon und Barbara Schröpfer sowie meiner Schwester Dr. Stefanie Schröpfer. Ihr hattet stets ein offenes Ohr. Damit habt Ihr mir die Arbeit mehr als erleichtert. Zudem erinnert Ihr mich oft daran, dass es neben Schweiß eigenspannungen auch andere spannende Dinge im Leben gibt!

Dirk Schröpfer

Berlin, im Juli 2017

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ACC	Beschleunigtes Abkühlen (engl.: Accelerated cooling)
AH	Ausscheidungshärten
AHR	Aufheizrate
AR	Warmgewalzter Stahl (engl.: As rolled)
α	Ferritische Phase
B	Bainit
CTW	-Prüfanlage (engl.: Controlled Tensile Weldability)
DIC	Digitale Bildkorrelation (engl.: Digital Image Correlation)
DoE	Statistische Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments)
DQ	Intensiv gekühlt (engl.: Direct quenching)
DTA	Differenz-Thermoanalyse (engl.: Differential Thermal Analysis)
DV	Doppel-V-Naht, siehe V-Naht
EC	Eurocode
F	Ferrit (mit (K)F - Korngrenzenferrit, (N)F - Nadelferrit)
FAT	-Klasse (engl.: Fatigue class), Kennzeichnung der ertragbaren Schwingbreite bei $N = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln bei zyklischer Beanspruchung
FE	Finite Elemente
FES	Funkenemissionsspektrometrie
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau e. V.
fWEZ	Feinkörnige Wärmeeinflusszone
G46	Schweißzusatz, EN ISO 14341-A-G 46 M21 4Si1
G69	Schweißzusatz, EN ISO 16834-A-G 69 6 M Mn4Ni1,5CrMo
G89	Schweißzusatz, EN ISO 16834-A-G 89 6 M Mn4Ni2CrMo
γ	Austenitische Phase (nichtrekr. - nichtrekrallisiert, rekr. - rekristallisiert)
Gew.-%	Gewichtsprozent
GW	Grundwerkstoff

gWEZ	Grobkörnige Wärmeeinflusszone
I	-Naht, I-förmig ausgeprägte Nahtform
IRC	-Prüfanlage (engl.: Instrumented Restraint Cracking)
iWEZ	Interkritisch erhitzte Wärmeeinflusszone, teilaustenitisierter Bereich
K	Kurzlichtbogen
KF	Kornfeinung
konv.	Konventionell
M	Martensit
M-Stahl	Thermomechanisch behandelter Stahl
MAG	Metall-Aktiv-Gas(-Schweißen)
MLE	Mikrolegierungselemente
mod.	Modifiziert
MX	-Phase, Metall-Carbide, -Nitride oder -Carbonitride
N	Normalisierter Stahl
NF	Neutrale Faser
Q-Stahl	Vergüteter Stahl (engl.: Quenched and tempered)
QST	Abgeschreckt und selbstangelassen (engl.: Quenched and self-tempered)
RT	Raumtemperatur (für Eigenspannungen im engeren Sinne auch: Umgebungstemperatur bzw. vollständiger Temperatúrausgleich mit der Umgebung)
SG	Schweißgut
SL	Schmelzlinie bzw. Nahtübergang von Schweißgut zu WEZ
SZ	Schweißzusatz (SZ-F - SZ für die Füllraupen, SZ-W - SZ für die Wurzellage)
SSDTA	Einsensor-Differenz-Thermoanalyse (engl.: Single Sensor Differential Thermal Analysis)
TE	Thermoelement
Ü	Übergangslichtbogen
UP	Unter Pulver(-Schweißen)
V	-Naht, V-förmig ausgeprägte Nahtform
WEZ	Wärmeeinflusszone
WIG	Wolfram-Inert-Gas(-Schweißen), bzw. engl.: TIG (Tungsten Inert Gas)
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungs(-Schaubild)

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	[mm]	Abstand (z. B. Hebelarmlänge)
a_V	[J·cm ⁻²]	Kerbschlagzähigkeit (auf Probenhöhe normiert)
A	[mm ²]	Flächeninhalt bzw. Nahtquerschnittsfläche (senkrecht zu Naht- richtung, Soll-Nahtquerschnittsfläche nach Nahtvorbereitung A_{soll} , Ist-Nahtquerschnittsfläche nach Schweißen A_{ist})
A_5	[%]	Bruchdehnung
A_x	[mm ²]	Nahtquerschnittsfläche (parallel zur Nahtlänge)
$A_{x,HP}$	[mm ²]	Tragender Querschnitt der Heftstellen
A_{C1}	[°C]	Beginn der Austenitbildung beim Erwärmen
A_{C3}	[°C]	Ende der Austenitbildung beim Erwärmen
A_{r1}	[°C]	Beginn der Umwandlung aus dem Austenitgebiet beim Abkühlen
A_{r3}	[°C]	Ende der Umwandlung aus dem Austenitgebiet beim Abkühlen
b	[mm]	Schweißnahtbreite
B_f	[°C]	Bainitfinishtemperatur
B_s	[°C]	Bainitstarttemperatur
CE_{IIW}	[%]	Kohlenstoffäquivalent nach DIN EN 1011-2, C.2 Verfahren A
CET	[%]	Kohlenstoffäquivalent nach DIN EN 1011-2, C.3 Verfahren B
C_{2MN}	[kN·mm ⁻¹]	Federsteifigkeit der 2-MN-Prüfanlage, Zuglast
C_{CTW}	[kN·mm ⁻¹]	Federsteifigkeit der 2-MN-Prüfanlage, Zuglast
$C_{y,Druck}$	[kN·mm ⁻¹]	Federsteifigkeit bei Druckbelastung in Nahtquerrichtung
$C_{y,Zug}$	[kN·mm ⁻¹]	Federsteifigkeit bei Zugbelastung in Nahtquerrichtung
d	[mm]	Durchmesser
D	[mm]	Netzebenenabstand
E	[kJ·mm ⁻¹]	Streckenenergie beim Schweißen
E_M	[MPa]	E-Modul
E_S	[-]	Standardisierter Effekt
F	[kN]	Kraft bzw. einwirkende Last
f_i	[kN]	Charakteristische (einwirkende) Last

F_j	[kN]	Kombinierte (einwirkende) Last, inkl. dynamischer Beiwerte
F_{f2}, F_{f3}	[-]	Formfaktoren zur Berechnung der Wärmeeinbringung nach DIN EN 1011-2
F_f	[°C]	Ferritfinishtemperatur
F_s	[°C]	Ferritstarttemperatur
F_y	[kN]	Reaktionskraft in Nahtquerrichtung
$F_{y,max}, F_{y,min}$	[kN]	Maximum bzw. Minimum der Reaktionskraft in Nahtquerrichtung
$F_{y,l}, F_{y,o}, F_{y,u}$	[kN]	In der 2-MN-Prüfanlage gemessene Reaktionskräfte an den Kolbenstangen: links, rechts-oben, rechts-unten
F_y	[kN]	Reaktionskraft in Nahtquerrichtung
$F_{y,end}$	[kN]	Endreaktionskraft in Nahtquerrichtung nach vollständiger Abkühlung
H	[mm]	Blechdicke
H_A	[mm]	Höhe einer montierten Quersteife
H_N	[mm]	Höhe der Schweißnaht bei N Schweißraupen bzw. Höhe des aktuell tragenden Querschnitts
$H_{NF,N}$	[mm]	Höhe der neutralen Faser des aktuell tragenden Nahtquerschnitts
$H_{NF,P}$	[mm]	Höhe der neutralen Faser der Probe
H_W	[mm]	Höhe der Wurzelschweißung
I	[A]	Schweißstrom
I_0	[W·m ⁻²]	Strahlungsintensität
k	[-]	Schnitt an einem Bauteil zum Tragfähigkeitsnachweis
K	[-]	Thermischer Wirkungsgrad zur Berechnung der Wärmeeinbringung nach DIN EN 1011-2
K_I	[N·(mm) ^{-$\frac{1}{3}$}]	Spannungsintensitätsfaktor (Bruchmechanik)
KV	[J]	Kerbschlagarbeit bzw. resultierende Kerbschlagarbeit bei 5 mm hohen Proben KV_{25}
L	[mm]	Länge
L_E	[mm]	Einspannlänge
L_S	[mm]	Schweißnahtlänge

$\lim \sigma$	[MPa]	Grenzwert für die Bemessungsspannung
m	[-]	Mittleres Verhältnis zweier Größen
M_f	[°C]	Martensitfinishtemperatur
M_s	[°C]	Martensitstarttemperatur
$M_{s,th}$	[°C]	Berechnete (theoretische) Martensitstarttemperatur
M_x	[kNm]	Biegemoment um die Nahtlängsachse (Reaktionsmoment)
$M_{x,end}$	[kNm]	Biegemoment um die Nahtlängsachse nach Abkühlung auf Raumtemperatur
M_z	[kNm]	Biegemoment um die Achse in Blechdickenrichtung
n	[-]	Ganze natürliche Zahl (z. B. Gangunterschied)
N	[-]	Anzahl an geschweißten Raupen
p	[-]	p-Wert (Überschreitungswahrscheinlichkeit)
p_F	[N·mm ⁻²]	Flächenlast
Q	[kJ·mm ⁻¹]	Wärmeeinbringung beim Schweißen
R	[MPa]	Spezifische Festigkeit bzw. charakteristischer Widerstand beim Tragfähigkeitsnachweis
R^2	[%]	Determinationskoeffizient, Qualität des Regressionsmodells
$R_e, R_{p0,2}$	[MPa]	Streckgrenze (bzw. obere Streckgrenze R_{eH}) und 0,2-%-Dehngrenze (beim Tragfähigkeitsnachweis gemäß Eurocode: f_y)
R_{Fy}	[kN(mm·mm) ⁻¹]	Einspanngrad in Nahtquerrichtung
$R_{Fy,1}$	[kN(mm·mm) ⁻¹]	Lokaler Einspanngrad (Nahtkonfiguration)
$R_{Fy,2}$	[kN(mm·mm) ⁻¹]	Struktureinspanngrad (Blechkonfiguration)
$R_{Fy,12}$	[kN(mm·mm) ⁻¹]	Kombinierter Einspanngrad von Blech- und Nahtkonfiguration (eine Seite bei Symmetrie: $R_{Fy,12s}$, linke oder rechte Seite bei Asymmetrie: $R_{Fy,12ls}$ bzw. $R_{Fy,12rs}$)
$R_{Fy,3}$	[kN(mm·mm) ⁻¹]	Systemeinspanngrad (2-MN-Prüfanlage $R_{Fy,2MN}$, CTW-Prüfanlage $R_{Fy,ctw}$)
$R_{Fy,ges}$	[kN(mm·mm) ⁻¹]	Gesamteinspanngrad in einer Anordnung
$R_{Fy,i}$	[kN(mm·mm) ⁻¹]	Teileinspanngrad in einer Anordnung i
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit (beim Tragfähigkeitsnachweis gemäß Eurocode: f_u)
R_{Mx}	[kNm(°·mm) ⁻¹]	Biegeeinspanngrad um die Nahtlängsachse

R'_σ	[-]	Spannungsverhältnis bei zyklischer Belastung, mit überlagerter normaler Reaktionsspannung
S	[-]	Standardabweichung
S_k	[MPa]	Lasteinwirkung am Schnitt k
t	[s]	Zeit
t_S	[s]	Zeitdauer für das Schweißen
$t_{S,A}$	[s]	Zeitdauer für das Schweißen inkl. An- und Auslaufblechen
T_{Ed}	[°C]	Referenztemperatur (Wahl der Erzeugnisdicke nach DaSt 009)
T_i	[°C]	Zwischenlagentemperatur (engl.: interpass temperature)
T_{Mess}	[°C]	Messtemperatur
T_{Ref}	[°C]	Referenztemperatur
T_p	[°C]	Vorwärmtemperatur (engl.: preheat temperature)
$T_{p/i}$	[°C]	Arbeitstemperatur (Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur)
U	[V]	Schweißspannung
v_D	[m·min ⁻¹]	Drahtvorschub beim Schweißen
v_H	[m·s ⁻¹]	Hubgeschwindigkeit
v_S	[mm·min ⁻¹]	Schweißgeschwindigkeit
V	[mm ³]	Volumen bzw. Nahtfugenvolumen beim Schweißen (V_{Fuge})
W_x	[mm ³]	Widerstandsmoment um die Nahtlängsachse
x, y, z	[mm]	Raumkoordinaten (Längs-, Quer- und Dickenrichtung der Schweißnaht)
Z	[%]	Brucheinschnürung

Griechische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	[°]	Nahtöffnungswinkel
α_W	[-]	Beiwert für Schweißnähte (Widerstand)
γ_m	[-]	Widerstandsbeiwert
γ_n	[-]	Risikobeiwert
γ_p	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkung
$\gamma_{y,m}$	[-]	Mittlere Dehnung in Nahtquerrichtung
ΔA_x	[mm ²]	Anstieg des tragenden Nahtquerschnittes einer Schweißnaht beim Einbringen einer Schweißbraupe
ΔF_y	[kN]	Transienter Anstieg der Querschrumpfkraft bei Abkühlphase $\Delta F_{y,K}$ bzw. Reduzierung während der Wärmeeinbringung beim Schweißen $\Delta F_{y,S}$
ΔM_x	[kNm]	Transienter Anstieg des Reaktionsmomentes bei Abkühlphase $\Delta M_{y,K}$ bzw. Reduzierung während der Wärmeeinbringung beim Schweißen $\Delta M_{y,S}$
$\Delta t_{8/5}$	[s]	Abkühlzeit von 800 °C auf 500 °C
$\Delta t_{8/5,2D},$ $\Delta t_{8/5,3D}$	[s]	Abkühlzeit von 800 °C auf 500 °C, berechnet für zwei- bzw. dreidimensionale Wärmeableitung nach DIN EN 1011-2,
Δt_S	[s]	Differenz bei der Gesamtschweißzeit
ΔT	[°C]	Temperaturdifferenz
$\Delta x, \Delta y,$ Δz	[mm]	Verschiebung in Längs-, Quer- und Dickenrichtung der Schweißnaht
Δy_{end}	[mm]	Mittlere Verschiebung in Nahtquerrichtung nach vollständiger Abkühlung
Δy_i	[mm]	Mittlere Verschiebung einer Nahtflanke i in Nahtquerrichtung
$\Delta y_{Naht,abs}$	[mm]	Absolute mittlere Verschiebung in Nahtquerrichtung im nahtnahen Bereich
$\Delta y_{Naht,rel}$	[mm]	Relative mittlere Verschiebung in Nahtquerrichtung im nahtnahen Bereich
Δy_m	[mm]	Mittlere Verschiebung in Nahtquerrichtung (mittlere Aufweitung $2\Delta y_m$)
$\Delta y_{Rand,abs}$	[mm]	Absolute mittlere Verschiebung in Nahtquerrichtung im randnahen Bereich
$\Delta \beta$	[°]	Winkelverzug (um die Nahtlängsachse)

$\Delta\sigma_y$	[MPa]	Transienter Anstieg der Reaktionsspannung quer zur Naht bei Abkühlphase $\Delta\sigma_{y,K}$ bzw. Reduzierung während der Wärmeeinbringung beim Schweißen $\Delta\sigma_{y,S}$ sowie bei der Phasenumwandlung in Ferrit $\Delta\sigma_{y,F}$, Bainit $\Delta\sigma_{y,S}$ oder Martensit $\Delta\sigma_{y,M}$
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	[%]	Dehnung in Längs-, Quer- und Dickenrichtung der Schweißnaht
$\epsilon_{y,end}$	[%]	Mittlere Dehnung in Nahtquerrichtung nach vollständiger Abkühlung
$\epsilon_{y,m}$	[%]	Mittlere Dehnung in Nahtquerrichtung
θ	[°]	Beugungswinkel
κ	[-]	Faktor zur Aufweitung des Versuchsraumes, Durchführung von Sternpunktversuchen im zentral zusammengesetzten Versuchsplan
λ	[-]	Lokale Eigenschaften in einer Schweißnaht
λ_w	[mm]	Wellenlänge
ν	[-]	Querkontraktionszahl
σ	[MPa]	Mechanische Spannung
$\sigma^I, \sigma^{II}, \sigma^{III}$	[MPa]	Eigenspannungen I., II. und III. Art
$\sigma'_{E,SL}, \sigma'_{E,max}, \sigma'_{E,WEZ}$	[MPa]	Bemessungsspannung durch Lastspannungen und Schweißbeigenspannungen an der Schmelzlinie, am Ort der maximalen Eigenspannungen oder in der WEZ
σ_{Ed}	[MPa]	Festigkeit bei Erzeugnisdicke, gemäß DaSt 009
σ_I	[MPa]	Bemessungsspannung beim Tragfähigkeitsnachweis (bzw. gemäß neuem Ansatz: σ'_I)
σ_{I1}	[MPa]	Bemessungsspannung durch Einwirkende Last beim Tragfähigkeitsnachweis (bzw. gemäß neuem Ansatz: σ'_{I1})
σ_{I2}	[MPa]	Bemessungsspannung durch lokale Einflüsse (bzw. gemäß neuem Ansatz: σ'_{I2})
σ_m	[MPa]	Mittelspannung bei zyklischer Belastung
σ'_m	[MPa]	Mittelspannung mit überlagerter normaler Reaktionsspannung bei zyklischer Belastung
$\sigma_{min}, \sigma_{max}$	[MPa]	Minimum- und Maximum einer Spannung einer Lastamplitude bei zyklischer Belastung

$\sigma_{nlp}, \sigma_{hs}, \sigma_{nom}$	[MPa]	Spannungsüberhöhung infolge der Naht, der Struktur und der Nennspannungen
σ_s	[MPa]	Lastspannung
σ_y	[MPa]	Reaktionsspannung am Nahtquerschnitt
$\sigma_{y,end}$	[MPa]	Endreaktionsspannung am Nahtquerschnitt nach vollständiger Abkühlung
$\sigma_{y,max}, \sigma_{y,min}$	[MPa]	Maximum bzw. Minimum der Reaktionsspannung am Nahtquerschnitt
$\sigma_{y,Mx}$	[MPa]	Biegespannung durch Biegemoment um die Nahtlängsachse
$\sigma_{y,S}$	[MPa]	Reaktionsspannung am Nahtquerschnitt nach dem Schweißen
$\sigma_{y,top}$	[MPa]	Gesamtreaktionsspannung an der Schweißnahtoberseite
$\sigma_{y,topW}$	[MPa]	Gesamtreaktionsspannung an der Oberseite der Wurzelschweißung
$\sigma_{y,W}$	[MPa]	Reaktionsspannung am Querschnitt der Wurzel nach Abkühlung auf Zwischenlagentemperatur
σ_{zw}	[MPa]	Schweißbedingte Zwängungsspannungen im Nahtbereich
$\sigma_x^E, \sigma_y^E, \sigma_z^E$	[MPa]	Eigenspannungen in Längs-, Quer- und Dickenrichtung der Schweißnaht
$\sigma_{y,GW}^E$	[MPa]	Mittlere Quereigenspannungen im unbeeinflussten Grundwerkstoff (bzw. bezogen auf den Ausgangszustand des Grundwerkstoffes $\Delta\sigma_{y,GW}^E$)
$\sigma_{y,m}^E$	[MPa]	Mittlere Quereigenspannungen in der Schweißnaht bzw. Schweißgut
$\sigma_{y,max}^E$	[MPa]	Maximale Quereigenspannungen im Nahtbereich
$\sigma_{y,SL}^E$	[MPa]	Quereigenspannungen am Nahtübergang
$\sigma_{y,WEZ}^E$	[MPa]	Mittlere Quereigenspannungen in der Wärmeeinflusszone (bzw. bezogen auf den Ausgangszustand des Grundwerkstoffes $\Delta\sigma_{y,WEZ}^E$)
ϕ_i	[-]	Dynamischer Beiwert für eine Lastkombination (mit HC1 bis HC4 und HD1 bis HD5 - Hubklassen bzw. Klassen des Hubwerkstyp und Bedienart gemäß EN 13001)
ψ	[°]	Orientierungswinkel der Messrichtung
$\omega_{Element}$	[%]	Massenanteil des Legierungselementes

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung und Abstract	vii
Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis	xiii
Inhaltsverzeichnis	xxiii
1. Einleitung	1
2. Kenntnisstand	5
2.1. Höherfeste Schweißkonstruktionen	5
2.1.1. Einsatz und Auslegung höherfester Schweißkonstruktionen	6
2.1.2. Konzepte zur Quantifizierung von Schrumpfung und Schrumpfbinderung	9
2.2. Herausforderung beim Schweißen höherfester Feinkornbaustähle	13
2.2.1. Wesentliche metallurgische Aspekte höherfester Verbindungen	13
2.2.2. Typische eingesetzte Schweißprozesse und -parameter	18
2.2.3. Wärmeführung und Schweißverhalten bei höherfesten Feinkornbaustählen	20
2.3. Eigenschaften höherfester Feinkornbaustähle	22
2.3.1. Festigkeitssteigerung durch Herstellungsverfahren	23
2.3.2. Festigkeitssteigerung durch Legierung	24
2.3.3. Festigkeit von Schweißgütern	26
2.4. Schweißbedingter Eigenspannungszustand	28
2.4.1. Lokale Schweißeigenspannungen	28
2.4.2. Globale Bauteilspannungen	34
2.5. Beanspruchungsanalysen	41
2.5.1. Bewertung und Optimierung schweißbedingter Beanspruchung	41
2.5.2. Praktisch relevante Verfahren zur lokalen Eigenspannungsanalyse	42
2.6. Schlussfolgerungen aus dem Kenntnisstand und Aufgabenstellung	44
3. Versuchsdurchführung	49
3.1. Analytierte Werkstoffe	49
3.1.1. Grundwerkstoffe	50
3.1.2. Zusatzwerkstoffe	50
3.2. Aufbau der Schweißversuche und Schweißparameter	51
3.2.1. Schweißanlage	51
3.2.2. Probendimensionen	52
3.2.3. Versuchsanordnung unter freier Schrumpfung	52
3.2.4. Ermittlung von Umwandlungstemperaturen mittels SSDTA	54
3.2.5. Schweißparameter	55
3.2.6. Variation der Wärmeführung	56
3.2.6.1. Versuchsplanung für den Grundwerkstoff S690QL	56
3.2.6.2. Versuchsplanung für den Grundwerkstoff S960QL	57
3.2.7. Variation der Nahtkonfiguration bei S960QL	58
3.2.8. Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften	60

3.3. Bauteilanalysen	61
3.3.1. Einspanngrade bei der Bauteilanalyse	61
3.3.2. CTW-Prüfanlage	62
3.3.3. 2-MN-Prüfanlage	64
3.4. Beanspruchungsanalysen	67
3.4.1. Globale Eigenbeanspruchungsanalysen	67
3.4.2. Lokale Eigenspannungsanalysen	67
3.4.3. Statistische Versuchsplanung für die Beanspruchungsanalysen	68
4. Ergebnisse und Diskussion	71
4.1. Wärmeführung und Schweißnahtgefüge	71
4.1.1. Einflüsse auf die $\Delta t_{8/5}$ -Abkühlzeiten	73
4.1.1.1. Prozessspezifische Einflüsse	74
4.1.1.2. Geometrische Einflüsse	76
4.1.1.3. Werkstoffspezifische Einflüsse	77
4.1.2. SSDTA und Schweißnahtgefüge	79
4.1.2.1. Werkstoffkombination S690QL und G69	79
4.1.2.2. Werkstoffkombination S960QL und G89	84
4.2. Einspanngradanalysen	90
4.2.1. Einspanngrade realitätsnaher Bauteilstrukturen	91
4.2.2. Einspanngrade realer Bauteile	97
4.2.3. Bewertung der Einspanngrade	99
4.2.4. Biegeeinspanngrade	100
4.3. Beanspruchungsanalysen	102
4.3.1. Globale Beanspruchungen	102
4.3.1.1. Reaktionskräfte beim Schweißen unter Schrumpfbehinderung	102
4.3.1.2. Bestimmung der normalen Reaktionsspannungen	104
4.3.1.3. Bestimmung der Reaktionsmomente	107
4.3.1.4. Auswirkung der Reaktionsmomente	111
4.3.2. Lokale Beanspruchungen	112
4.3.2.1. Quereigenspannungen	112
4.3.2.2. Längseigenspannungen	114
4.3.3. Superposition lokaler und globaler Beanspruchungen	115
4.3.3.1. Eigenspannungen unter Last an 20 mm dicken Schweißproben	115
4.3.3.2. Eigenspannungen unter Last an 8 mm dicken Schweißproben	116
4.4. Einflüsse auf die schweißbedingten Beanspruchungen	118
4.4.1. Werkstoffauswahl	118
4.4.1.1. Einfluss auf die normalen Reaktionsspannungen	118
4.4.1.2. Einfluss auf strukturelle Reaktionsspannungen	124
4.4.1.3. Einfluss auf lokale Eigenspannungen der Schweißnaht	127
4.4.2. Prozessgrößen	130
4.4.2.1. Einfluss auf normale Reaktionsspannungen	130
4.4.2.2. Einfluss auf strukturelle Reaktionsspannungen	139
4.4.2.3. Einfluss auf lokale Eigenspannungen der Schweißnaht	144
4.4.3. Konstruktive Aspekte	149
4.4.3.1. Einfluss auf normale Reaktionsspannungen	149
4.4.3.2. Einfluss auf strukturelle Reaktionsspannungen	150
4.4.3.3. Einfluss auf lokale Eigenspannungen der Schweißnaht	152

4.4.4. Interaktion der Effekte	157
4.4.4.1. Wechselwirkungen bei normalen Reaktionsspannungen	157
4.4.4.2. Wechselwirkungen bei strukturellen Reaktionsspannungen	161
4.4.4.3. Wechselwirkungen bei lokalen Beanspruchungen im Nahtbereich	166
4.5. Einflüsse und Wechselwirkungen im Überblick	176
4.6. Ansätze zur Bewertung und Optimierung schweißbedingter Beanspruchungen	179
4.6.1. Festigkeitsnachweis beim Einsatz höherfester Stähle	181
4.6.2. Ansatz mit Nennspannungen	182
4.6.3. Ansatz mit Strukturspannungen	184
4.6.4. Ansatz mit lastkritischen Eigenspannungsbereichen	186
4.7. Berechnungsbeispiel für eine tragende Schweißnaht im Mobilkranbau	188
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	191
Literaturverzeichnis	199
Abbildungsverzeichnis	215
Tabellenverzeichnis	227
A. Anhang	229
A.1. Probenentnahmeplan	230
A.2. Mechanisch-technologische Nahteigenschaften	231
A.2.1. Querschliffe und Härtemessung	231
A.2.2. Zugfestigkeit	233
A.2.3. Kerbschlagzähigkeit	235
A.3. SSDTA	237
A.4. DIC-Analysen	239