

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Postfach 10 48 42

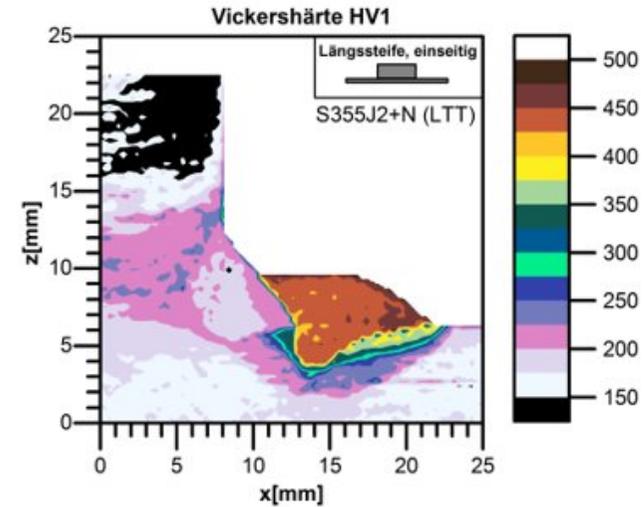
40039 Düsseldorf

Sohnstr. 65

40237 Düsseldorf

fosta@stahlforschung.de

www.stahlforschung.de



Schwingfestigkeitsverbesserung hochfester Schweißverbindungen mit Hilfe neuartiger LTT-Zusatzwerkstoffe

Fatigue strength improvement of high strength
steel welds by new LTT-filler materials

Forschung für die Praxis P 1060

Forschungsvorhaben P 1060 / IGF-Nr. 18599 N

Schwingfestigkeitsverbesserung hochfester Schweißverbindungen mit Hilfe neuartiger LTT-Zusatzwerkstoffe

Fatigue strength improvement of high strength steel welds by new LTT-filler materials

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM),
Abt. 9.4 Integrität von Schweißverbindungen, Berlin
Prof. Dr.-Ing. Thomas Kannengießer
Dr.-Ing. Arne Kromm
Dipl.-Wirt.-Ing. Jonny Dixneit

Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger
Dr.-Ing. Thomas Nitschke-Pagel
Dr.-Ing. Jonas Hensel
Dipl.-Ing. Hamdollah Eslami

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Dipl.-Ing. Rainer Salomon

Das IGF-Vorhaben 18599 N der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Abt. 9.4 Integrität von Schweißverbindungen, Berlin, und am Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig, durchgeführt.

Beteiligte Einrichtungen im PA:

AG der Dillinger Hüttenwerke, Dillingen

ArcelorMittal Global R&D, Gent, Belgien

Benteler Automobiltechnik GmbH, Paderborn

EWM AG, Mündersbach

Fronius International GmbH, Wels, Österreich

Ingenieurbüro Niemann, Magdeburg

Liebherr Werk Biberach GmbH, Biberach a.d.Riß

Lincoln Electric Europe B.V., Nijmegen, Niederlande

Merkle Schweißtechnik Berlin GmbH, Berlin

Roßlauer Schiffswerft GmbH & Co. KG, Dessau-Roßlau

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg

Schweißtechn. Lehr- u Versuchsanst. Mecklenburg-Vorpommern GmbH, Rostock

SSAB Swedish Steel GmbH, Düsseldorf

Stahlbau Magdeburg GmbH, Magdeburg

TADANO FAUN GmbH, Lauf

Terex Cranes Germany GmbH, Zweibrücken

thyssenkrupp Steel Europe AG, Duisburg

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Stuttgart

voestalpine Stahl GmbH, Linz, Österreich

© 2020 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Printed in Germany

Bestell-Nr. P 1060

ISBN 978-3-946885-75-7

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

Kurzdarstellung

Die Verwendung von LTT-Zusatzwerkstoffen stellt einen alternativen Ansatz zu den sonst üblichen Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung zur Schwingfestigkeitserhöhung geschweißter Stahlkonstruktionen dar. Der wesentliche Wirkmechanismus beruht auf der Beeinflussung des Eigenspannungszustands durch die niedrige Martensitstarttemperatur bereits während des Schweißens. Dadurch werden die Druckeigenspannungen aus der behinderten Volumenausdehnung infolge Phasenumwandlung voll wirksam. Weiter weist die Schweißnaht eine hohe Härte auf, die die Schwingrissbildung verzögern kann, allerdings auch zu einer niedrigen Kerbschlagarbeit führt.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden grundlegende Untersuchungen zur schweißtechnischen Verarbeitung eines LTT-Zusatzwerkstoffes durchgeführt. Dies beinhaltet die Sicherstellung der Schweißbarkeit sowie die Charakterisierung der Verbindungseigenschaften. Untersuchungen zur Schweißeignung machten deutlich, dass ein sicherer Einsatz in dem für hochfeste Stähle zur Verfügung stehenden Arbeitsfenster möglich ist. Der verwendete LTT-Zusatz auf Cr-Ni-Basis lässt sich mit hoher Nahtgüte fügen. Auch die mechanischen Eigenschaften erlauben den Einsatz im Bereich hochfester Stähle mit einer Streckgrenze von 960 MPa. Entwicklungspotential gibt es hinsichtlich der Zähigkeit. Die in dieser Arbeit erreichten Kerbschlagwerte liegen deutlich unter denen kommerziell verfügbarer konventioneller Schweißgüter. Die Untersuchungen belegen, dass der Effekt der martensitischen Phasenumwandlung im gesamten Schweißgut zum Tragen kommt. Die angestrebten hohen Druckeigenspannungen finden sich vornehmlich im Schweißgutinnern.

Im weiteren Vorgehen wurden Schwingfestigkeitsuntersuchungen an den Stählen S355J2 und S960Q unter Verwendung konventioneller Zusatzwerkstoffe im Vergleich zum LTT-Zusatz durchgeführt. Die verwendeten Konstruktionsdetails sind ein Stumpfstoß unter Variation der Schweißnahtausführung (DY-Naht und V-Naht), ein Kreuzstoß mit HV-Naht sowie ein Überlappstoß mit einseitig und beidseitig geschweißter Kehlnaht. Weitergehend wurde eine bauteilähnliche Probe (die Längssteife) untersucht, bei der der LTT-Zusatzwerkstoff als zusätzliche Schweißlage aufgebracht wurde. Neben der Schwingfestigkeit wurden die Schweißnähte hinsichtlich der Eigenspannungen, der Eigenspannungsstabilität im Schwingversuch sowie metallografisch charakterisiert. Eine generell positive Wirkung des LTT-Zusatzwerkstoffes im Hinblick auf die Schwingfestigkeitssteigerung kann nicht bestätigt werden. Teilweise ist eine Steigerung der Schwingfestigkeit bei Substitution konventioneller Zusatzwerkstoffe zu beobachten, teilweise zeigt sich kein Effekt. Ursächlich hierfür ist die bei manchen Stoßformen mangelnde Steifigkeit quer zur Schweißnaht, die zur Ausbildung hoher Druckeigenspannungen infolge Phasenumwandlung notwendig wäre. Die bauteilähnliche Längssteife bestätigt allerdings das grundlegende Potential der LTT-Zusatzwerkstoffe bei Vorliegen hinreichender Steifigkeit.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

April 2020

Abstract

The use of LTT filler materials represents an alternative approach to the usual methods of weld post-treatments for increasing the fatigue resistance of welded steel structures. The essential mechanism is based on the influence of the low martensite start temperature on the residual stress state already during welding. As a result, the compressive residual stresses from the hindered volume expansion due to phase transformation become fully effective. Furthermore, the weld has a high hardness, which can delay the formation of cracks, but also leads to a low notched bar impact energy.

In the present research project, fundamental investigations were carried out into the welding processing of an LTT filler material. This includes ensuring weldability and characterizing the joint properties. Investigations into weldability made it clear that safe use is possible in the working range available for high-strength steels. The Cr-Ni-based LTT filler can be joined with high weld seam quality. The mechanical properties also allow the use in the field of high-strength steels with a yield strength of 960 MPa. There is potential for development in terms of toughness. The notch impact values achieved in this work are significantly lower than commercially available conventional weld metals. The investigations prove that the impact of the martensitic phase transformation has an effect on the entire weld metal. The intended high compressive residual stresses are mainly found in bulk of the weld metal.

Fatigue tests were carried out on the steels S355J2 and S960Q using conventional filler materials in comparison to the LTT filler. The construction details used are a butt joint with variation of the weld seam design (DY seam and V seam), a cross joint with HV seam and an overlap joint with a fillet weld on one and both sides. Furthermore, a component-like specimen (longitudinal stiffener) was examined, in which the LTT filler material was applied as an additional welding layer. In addition to the fatigue strength, the welds were characterized in terms of residual stresses, residual stress stability during fatigue testing and metallographic examinations. The results show that LTT fillers can lead to a significant increase in fatigue resistance in compliance with important design guidelines. This allows the lightweight construction potential of high-strength steel grades to be exploited.

FOSTA - Research Association for Steel Application

April 2020

Inhaltsverzeichnis
Content

1	Einleitung Introduction	1
1.1	Problemstellung Problem definition	1
1.2	Motivation Motivation.....	2
1.3	Zielsetzung Objective	3
2	Stand der Technik State of the art	4
2.1	Problemstellung Problem definition	4
2.1.1	Theoretischer Hintergrund Theoretical background	4
3	Vorgehensweise und Versuchsplanung Approach and design of experiments.....	10
3.1	Vorgehensweise Approach.....	10
3.2	Durchgeführte Untersuchungen Conducted experiments.....	11
3.3	Verwendete Werkstoffe Material characterisation	14
3.4	Herstellung der Schweißproben Preperation of conventionally welded specimens	15
3.5	Metallographische Untersuchung Metallographic characterisation.....	18
3.6	Ermittlung der Proben- und Schweißnahtgeometrie Determination of specimen and weld geometry	24
4	Untersuchung der Schweißbarkeit der LTT-Zusatzwerkstoffe Weldability of LTT-filler materials	27
4.1	Methode	27
4.2	Schweißtechnische Verarbeitung und Nahteigenschaften	28
4.3	Eigenspannungen in Abhängigkeit der Prozessparameter.....	32
5	Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der Schweißbedingungen und des Einspanngrades Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and restraint	35
5.1	Methode	35
5.2	Spannungsanalyse unter Einspannung.....	39
6	Schwingfestigkeitsuntersuchungen Fatigue testing	45
6.1	Methode Method	45
6.2	Schwingversuche an S355J2+N Fatigue testing of welds made from S355J2+N	46
6.2.1	Stumpfstöße aus S355J2+N Butt welds made from S355J2+N	46
6.2.2	Kreuzstöße aus S355J2+N Cruciform joints made from S355J2+N.....	49
6.2.3	Überlappstöße aus S355J2+N Overlap joints made from S355J2+N...51	

6.2.4	Längssteifen aus S355J2+N Longitudinal stiffener made from S960Q	54
6.3	Schwingversuche an Schweißnähten aus S960Q Fatigue testing of welds made from S960Q	55
6.3.1	Stumpfstöße aus S960Q Butt welds made from S960Q	55
6.3.2	Kreuzstöße aus S960Q Cruciform joints made from S960Q	57
6.3.3	Überlappstöße aus S960Q Overlap joints made from S960Q	59
6.3.4	Längssteifen aus S960Q Longitudinal stiffener made from S960Q	61
6.4	Schwingversuche an LTT-Proben mit Nachbehandlung Fatigue testing of LTT-welds with post weld treatments	62
6.4.1	Stumpfstöße aus S355J2+N Butt welds made from S355J2+N	62
6.4.2	Stumpfstöße aus S960Q Butt welds made from S960Q	64
6.5	Kerbspannungsanalysen Überlappstoß Notch stress analysis of overlap joints ..	65
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	66
7	Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben Determination of residual stresses and residual stress relaxation	69
7.1	Methode Method	69
7.2	Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an konventionell geschweißten Proben aus S355J2+N Residual stress determination in conventionally welded specimens by means of X-ray diffraction	71
7.2.1	Stumpfstöße aus S355J2+N Butt welds made from S355J2+N	71
7.2.2	Kreuzstöße aus S355J2+N Cruciform joints made from S355J2+N	73
7.2.3	Überlappstoß aus S355J2+N Overlap joints made from S355J2+N	74
7.2.4	Längssteife aus S355J2+N Longitudinal stiffener made from S355J2+N	76
7.3	Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an konventionell geschweißten Proben aus S960QL Residual stress Determination in conventionally welded specimens by means of X-ray diffraction	77
7.3.1	Stumpfstöße aus S960Q Butt welds made from S960Q	77
7.3.2	Kreuzstöße aus S960Q Cruciform joints made from S960Q	78
7.3.3	Überlappstoß aus S960Q Overlap joint made from S960Q	80
7.4	Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an LTT-geschweißten Proben aus S355J2+N Residual stress determination in LTT-welded specimens by means of X-ray diffraction	81
7.4.1	Stumpfstöße aus S355J2+N Butt welds made from S355J2+N	81
7.4.2	Kreuzstöße aus S355J2+N Cruciform joints made from S355J2+Nv ..	84
7.4.3	Überlappstöße aus S355J2+N Overlap joints made from S355J2+N ..	86

7.4.4 Längssteife aus S355J2+N Longitudinal stiffener made from S355J2+N	87
7.5 Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an LTT-geschweißten Proben aus S960Q Residual stress determination in LTT-welded specimens by means of X-ray diffraction.....	88
7.5.1 Stumpfstöße aus S960Q Butt welds made from S960Q	88
7.5.2 Kreuzstöße aus S960Q Cruciform joints made from S960Q.....	91
7.5.3 Überlappstöße aus S960Q Overlap joints made from S960Q.....	93
7.5.4 Längssteife aus S960Q Longitudinal stiffener made from S960Q.....	94
7.6 Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an LTT-geschweißten Proben mit Nachbehandlung Residual stress determination in LTT-welded specimens with post-weld treatment by means of X-ray diffraction.....	95
7.6.1 HFMI-Nachbehandlung HFMI-treatment	95
7.6.2 WIG-Nachbehandlung TIG-treatment.....	98
7.7 Untersuchungen zur Eigenspannungsstabilität Investigations on residual stress relaxation	100
7.7.1 Eigenspannungsabbau infolge zügiger Beanspruchung Residual stress relaxation under static loading.....	100
7.7.2 Zyklischer Eigenspannungsabbau Cyclic residual stress relaxation...	104
7.8 Eigenspannungsbewertung Evaluation of residual stress effects.....	108
7.8.1 Stumpfstöße.....	108
7.8.2 Kreuzstöße.....	108
7.8.3 Überlappstöße.....	109
7.8.4 Längssteife.....	109
8 Zusammenfassung Summary	110
9 Ausblick Perspective.....	112
10 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen List of publications related to the project	113
11 Ergebnistransfer in die Wirtschaft Transfer to economy.....	114
12 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept	118
13 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten Presentation of the scientific- technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry.....	119
14 Literaturverzeichnis Bibliography	122

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schwingfestigkeit von Baustählen mit unterschiedlicher Streckgrenze nach dem LBH-Schweißen mit konventionellen und mit LTT-Elektroden, nach [14]	6
Abbildung 2 Eigenspannungen an Überlappverbindungen zweier Baustähle mit $Re = 540$ MPa (links) und $Re = 780$ MPa (rechts) nach dem LBH-Schweißen mit konventionellen und mit LTT-Stabelektroden, nach [14].....	6
Abbildung 3 Schwingfestigkeiten eines Baustahls ($Re = 235$ MPa) geschweißt mit konventionellen und mit LTT-Stabelektroden [9]	7
Abbildung 4 Längs- (links) und Quereigenspannungen (rechts) in der Oberfläche einer 20-mm-Mehrlagenstumpfnahthverbindung aus S355 geschweißt mit einem LTT-Zusatzwerkstoff.....	8
Abbildung 5 Schlibbilder der verwendeten Grundwerkstoffe S355J2 (links) und S960QL (rechts). Ätzung Nital.....	14
Abbildung 6 Verwendete Probenformen a) Stumpfstoß mit V-Naht, b) Stumpfstoß mit DY-Naht (mit Wurzelspalt), c) Kreuzstoß mit HV-Naht, d) Überlappstoß mit Kehlnaht (ein- und zweiseitig) sowie e) T-Stoß mit Kehlnaht (Längssteife) und LTT als Zusatzlagen	15
Abbildung 7 Geschweißter Kreuzstoß mit HV-Naht nach der Schwingprobenentnahme mittels Wasserstrahlschneiden	16
Abbildung 8 Härteverteilung (HV1) und Schlibbilder der Stoßformen aus S355J2+N konventionell	19
Abbildung 9 Härteverteilung (HV1) und Schlibbilder der Stoßformen aus S355J2+N LTT-geschweißt.....	20
Abbildung 10 Härteverteilung (HV1) und Schlibbilder der Stoßformen aus S960Q konventionell	21
Abbildung 11 Härteverteilung (HV1) und Schlibbilder der Stoßformen aus S960Q LTT-geschweißt.....	22
Abbildung 12 Härteverteilung (HV1) und Schlibbilder der LTT-geschweißten Stoßformen aus S355J2+N und S960Q LTT mit HFMI und WIG-Schweißnahtnachbehandlung	23
Abbildung 13 Messaufbau zur Erfassung der Nahtgeometrie. Profilmessung mittig in Probenlängsrichtung.....	24
Abbildung 14 Aus dem Nahthöhenprofil ermittelter Winkelverzug vor und nach dem Richten, S355 J2+N konv. (links) und LTT-geschweißt (rechts).....	25
Abbildung 15 Aus dem Nahthöhenprofil ermittelter Winkelverzug vor und nach dem Richten, S960QL konv. (links) und LTT-geschweißt (rechts).	25
Abbildung 16 Aus dem Nahthöhenprofil ermittelter Nahtflankenwinkel der untersuchten Stoßformen aus S355J2+N (oben) und S960Q (unten). NÜ: Nahtübergang, NW: Nahtwurzel.....	26
Abbildung 17 Anteil an Cr und Ni im LTT-Schweißgut in Abhängigkeit des Schutzgases.....	28
Abbildung 18 Kerbschlagarbeit des LTT-Schweißgutes in Abhängigkeit des Schutzgases.....	29

Abbildung 19 Querschliffe mit Härteprofilen der LTT-Schweißgüter und Pfade der WDX-Elementanalyse, a) Stumpfstoß mit V-Naht, b) Stumpfstoß mit DY-Naht, c) Kreuzstoß mit HV-Naht, d) Überlappstoß mit Kehlnaht.....	30
Abbildung 20 Auf der Elementverteilung entlang der in Bild 6 skizzierten Pfade basierende Berechnung der Ms-Temperatur nach [26], a) Stumpfstoß mit V-Naht, b) Stumpfstoß mit DY-Naht, c) Kreuzstoß mit HV-Naht, d) Überlappstoß mit Kehlnaht.....	31
Abbildung 21 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfstoße mit V-Naht, Werkstoff S355+LTT-Zusatz; Vergleich nach dem Schweißen (Blech) und nach dem Heraustrennen der Schwingprobe	32
Abbildung 22 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfstoße mit V-Naht, Werkstoff S960+LTT-Zusatz; Vergleich nach dem Schweißen (Blech) und nach dem Heraustrennen der Schwingprobe	33
Abbildung 23 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfstoße mit DY-Naht, Gegenlage, Werkstoff S960+LTT-Zusatz; Vergleich nach dem Schweißen (Blech) und nach dem Heraustrennen der Schwingprobe	34
Abbildung 24 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfstoße mit DY-Naht, Lage 1, Werkstoff S960+LTT-Zusatz; Vergleich nach dem Schweißen (Blech) und nach dem Heraustrennen der Schwingprobe	34
Abbildung 25 Übersichtsaufnahme der „2-MN-Prüfanlage“ a), mit eingespannter Probe b)	36
Abbildung 26 Querschliff mit Härteprofil der in der Decklage mit LTT-Zusatz geschweißten Probe und Pfade der WDX-Elementanalyse	39
Abbildung 27 Auf der Elementverteilung entlang der in Abbildung 26 skizzierten Pfade basierende Berechnung der Ms-Temperatur nach [26].....	40
Abbildung 28 Reaktionskraft und Temperatur während des Schweißens, Grundwerkstoff S960 mit konventionellem Zusatz G Mn4Ni2 CrMo (links), mit LTT-Zusatz in den Raupen 6-8 (Decklage) (rechts).....	41
Abbildung 29 Reaktionskraft und Temperatur während des Schweißens der 8. Raupe, Grundwerkstoff S960 mit konventionellem Zusatz G Mn4Ni2 CrMo (links), LTT-Zusatz (rechts)	41
Abbildung 30 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfnähte mit V-Naht, Blechdicke 25 mm, Werkstoff S690+G Mn4Ni2 CrMo	42
Abbildung 31 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfnähte mit V-Naht, Blechdicke 25 mm, Werkstoff S690+G Mn4Ni2 CrMo (Raupe 1-5), LTT-Zusatz (Raupe 6-8).....	43
Abbildung 32 Längs-, Quer- und Normaleigenspannungen in unterschiedlichen Tiefen gemäß der Pfade im Schliffbild, Stumpfnähte mit V-Naht, Blechdicke 25 mm, Werkstoff S690+G Mn4Ni2 CrMo (Raupe 1-5), LTT-Zusatz (Raupe 6-8)	44
Abbildung 33 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S355J2+N.....	47
Abbildung 34 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S355J2+N	48
Abbildung 35 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Stumpfnähten (DY-Naht) aus S355J2+N	48

Verzeichnisse

Lists

Abbildung 36 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (DY-Naht) aus S355J2+N.....	49
Abbildung 37 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Kreuzstößen aus S355J2+N.....	50
Abbildung 38 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Kreuzstößen aus S355J2+N.....	50
Abbildung 39 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an einseitig konventionell geschweißten Überlappstößen aus S355J2+N	52
Abbildung 40 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an einseitig LTT-geschweißten Überlappstößen aus S355J2+N	52
Abbildung 41 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an beidseitig konventionell geschweißten Überlappstößen aus S355J2+N	53
Abbildung 42 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an beidseitig LTT-geschweißten Überlappstößen aus S355J2+N	53
Abbildung 43 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Längssteifen mit zusätzlicher konventioneller Lage im Bereich der Stirnseite aus S355J2+N	54
Abbildung 44 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Längssteifen mit zusätzlicher LTT-Lage im Bereich der Stirnseite aus S355J2+N	55
Abbildung 45 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S960Q.....	56
Abbildung 46 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Stumpfnähten (DY-Naht) aus S960Q.....	56
Abbildung 47 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (DY-Naht) aus S960Q	57
Abbildung 48 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Kreuzstößen aus S960Q	58
Abbildung 49 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Kreuzstößen aus S960Q	58
Abbildung 50 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an einseitig LTT-geschweißten Überlappstößen aus S960Q.....	60
Abbildung 51 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an beidseitig konventionell geschweißten Überlappstößen aus S960Q.....	60
Abbildung 52 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an beidseitig LTT-geschweißten Überlappstößen aus S960Q.....	61
Abbildung 53 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Längssteifen mit zusätzlicher LTT-Lage im Bereich der Stirnseite aus S960Q ..	62
Abbildung 54 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S355J2+N mit zusätzlicher Pit Schweißnahtnachbehandlung (HFMI)	63
Abbildung 55 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S355J2+N mit zusätzlicher WIG Schweißnahtnachbehandlung ...	63
Abbildung 56 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S960Q mit zusätzlicher Pit Schweißnahtnachbehandlung (HFMI)	64

Abbildung 57 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S960Q mit zusätzlicher WIG Schweißnahtnachbehandlung.....	65
Abbildung 58 Kerbspannungsbewertung der Überlappstöße aus S355J2+N (links) und S960Q (rechts). NW: Nahtwurzelsversagen, NÜ: Nahtübergangsversagen ..	66
Abbildung 59 Vergleichende Darstellung der Schwingfestigkeit $\Delta\sigma$ konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen aus S355J2+N bei 2 Millionen Lastwechseln .	67
Abbildung 60 Vergleichende Darstellung der Schwingfestigkeit $\Delta\sigma$ konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen aus S960Q bei 2 Millionen Lastwechseln.....	68
Abbildung 61 Vergleichende Darstellung der Schwingfestigkeit $\Delta\sigma$ LTT-geschweißter Verbindungen aus S355J2+N und S960Q bei 2 Millionen Lastwechseln mit Schweißnahtnachbehandlung HFMI (links) und WIG (rechts)	68
Abbildung 62 Messpfad für die röntgenografische Eigenspannungsbestimmung und Definition der Eigenspannungsrichtung (Stumpf- und Kreuzstoß, sowie Überlappstoß), Draufsicht Stumpfstoß	70
Abbildung 63 Messpfad für die röntgenografische Eigenspannungsbestimmung und Definition der Eigenspannungsrichtung, Draufsicht Längssteife	70
Abbildung 64 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N konv. V-Naht, Decklage	71
Abbildung 65 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N konv. V-Naht, Wurzellage	72
Abbildung 66 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N konv. DY-Naht, Decklage 1	72
Abbildung 67 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N konv. DY-Naht, Decklage 2	72
Abbildung 68 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N HK-Naht;	73
Abbildung 69 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N HK-Naht;	73
Abbildung 70 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N HK-Naht;	74
Abbildung 71 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N HK-Naht;	74
Abbildung 72 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Überlappstoß, einseitig Decklage/Seite1	75
Abbildung 73 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Überlappstoß, beidseitig Decklage/Seite1	75
Abbildung 74 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Überlappstoß, beidseitig Decklage/Seite2	75
Abbildung 75 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Längssteife, Decklage/Seite1	76
Abbildung 76 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Längssteife, Decklage/Seite2.....	77
Abbildung 77 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. DY-Naht, Decklage 1	78

Verzeichnisse

Lists

Abbildung 78 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. DY-Naht, Decklage 2.....	78
Abbildung 79 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. HK-Naht, Decklage 1.....	79
Abbildung 80 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. HK-Naht, Decklage 2.....	79
Abbildung 81 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. HK-Naht, Wurzellage 1.....	80
Abbildung 82 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. HK-Naht, Wurzellage 2.....	80
Abbildung 83 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL, Überlappstoß, beidseitig Decklage/Seite1.....	81
Abbildung 84 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL, Überlappstoß, beidseitig Decklage/Seite2.....	81
Abbildung 85 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N LTT, V-Naht, Decklage.....	82
Abbildung 86 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N LTT, V-Naht,.....	83
Abbildung 87 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N LTT, DY-Naht, Decklage 1.....	83
Abbildung 88 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N LTT, DY-Naht, Decklage 2.....	83
Abbildung 89 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT HK-Naht;.....	84
Abbildung 90 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT HK-Naht; Decklage Seite 2.....	85
Abbildung 91 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT HK-Naht; Wurzellage Seite 1.....	85
Abbildung 92 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT HK-Naht; Wurzellage Seite 2.....	85
Abbildung 93 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355J2+N LTT Überlappstoß einseitig; Seite 1.....	86
Abbildung 94 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355J2+N LTT Überlappstoß beidseitig; Seite 1.....	86
Abbildung 95 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT Überlappstoß beidseitig; Seite 2.....	87
Abbildung 96 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT Längssteife; Decklage 1.....	88
Abbildung 97 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT Längssteife; Decklage 2.....	88
Abbildung 98 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT V-Naht; Decklage.....	89
Abbildung 99 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT V-Naht; Wurzellage.....	90

Abbildung 100 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL LTT DY-Naht; Decklage 1	90
Abbildung 101 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL LTT DY-Naht; Decklage 2	90
Abbildung 102 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL, LTT HK-Naht;	91
Abbildung 103 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL, LTT HK-Naht;	92
Abbildung 104 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL, LTT HK-Naht;	92
Abbildung 105 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL, LTT HK-Naht;	92
Abbildung 106 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL LTT Überlappstoß, einseitig Seite 1	93
Abbildung 107 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL LTT Überlappstoß, beidseitig, Seite1	93
Abbildung 108 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL LTT Überlappstoß, beidseitig Seite 2	94
Abbildung 109 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL LTT Längssteife; Seite 1.....	94
Abbildung 110 Längseigenstressungen (l.) und Quereigenstressung (r.) S960QL LTT Längssteife; Seite 2.....	95
Abbildung 111 Eigenstressungen an Stumpfstoßen (V-Naht) aus S355J2+N, LTT- geschweißt und HFMI-nachbehandelt (Pit)	96
Abbildung 112 Eigenstressungen an Stumpfstoßen (V-Naht) aus S960Q, LTT- geschweißt und HFMI-nachbehandelt (Pit)	97
Abbildung 113 Eigenstressungen an Stumpfstoßen (V-Naht) aus S355J2+N, LTT- geschweißt und WIG-nachbehandelt	98
Abbildung 114 Eigenstressungen an Stumpfstoßen (V-Naht) aus S960Q, LTT- geschweißt und WIG-nachbehandelt	99
Abbildung 115 Eigenstressungs- (oben) und Integralbreitenverläufe (unten) an einer Längssteife (S355J2+N; konv.) unter Zugbeanspruchung bei unterschiedlichen Belastungen	101
Abbildung 116 Eigenstressungs- (oben) und Integralbreitenverläufe (unten) an einer Längssteife (S355J2+N; LTT) unter Zugbeanspruchung bei unterschiedlichen Belastungen	103
Abbildung 117 Eigenstressungs- (oben) und Integralbreitenverläufe (unten) an einer Längssteife (S960QL; LTT) unter Zugbeanspruchung bei unterschiedlichen Belastungen	104
Abbildung 118 Zyklischer Eigenstressungsabbau an einer Längssteife (S355J2+N; LTT) unter der Beanspruchung $R=0,1$, $\sigma_0 = 160$ MPa.....	106
Abbildung 119 Zyklischer Eigenstressungsabbau an einer Längssteife (S355J2+N; LTT) unter der Beanspruchung $R=0,1$, $\sigma_0 = 260$ MPa.....	106
Abbildung 120 Zyklischer Eigenstressungsabbau an einer Längssteife (S690QL; LTT) unter der Beanspruchung $R=0,1$, $\sigma_0 = 400$ MPa	107

Verzeichnisse

Lists

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Chemische Zusammensetzung der Grund- und Zusatzwerkstoffe	14
Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften der Grund- und Zusatzwerkstoffe	14
Tabelle 3 Schweißprozessparameter	17
Tabelle 4 Parameter der röntgenografischen Spannungsanalyse	28
Tabelle 5 Leistungsmerkmale des 2-MN-Prüfsystems	37
Tabelle 6 Schweißparameter und Temperaturführung	37
Tabelle 7 Mess- und Auswerteparameter der neutronografischen Spannungsanalyse	38

List of figures

Figure 1 Fatigue strength of structural steels with different yield strength after LBH welding with conventional and LTT electrodes, according to [14]	6
Figure 2 Residual stresses at lap joints of two structural steels with $Re = 540$ MPa (left) and $Re = 780$ MPa (right) after LBH welding with conventional and LTT stick electrodes, according to [14]	6
Figure 3 Fatigue strength of a structural steel ($Re = 235$ MPa) welded with conventional and LTT rod electrodes [9]	7
Figure 4 Longitudinal (left) and transverse residual stresses (right) in the surface of a 20 mm multi-layer butt joint of S355 welded with an LTT filler material	8
Figure 5 Micrographs of the base materials S355J2 (left) and S960QL (right). Etching Nital	14
Figure 6 Specimen forms used a) butt joint with V-seam, b) butt joint with DY-seam (with root gap), c) cross joint with HV-seam, d) lap joint with fillet weld (one- and two-sided) and e) T-joint with fillet weld (longitudinal stiffener) and LTT as additional layers	15
Figure 7 Welded cross joint with HV seam after vibration sampling by water jet cutting	16
Figure 8 Hardness distribution (HV1) and micrographs of the impact moulds made of S355J2+N conventional	19
Figure 9 Hardness distribution (HV1) and micrographs of the impact dies made of S355J2+N LTT-welded	20
Figure 10 Hardness distribution (HV1) and micrographs of the impact moulds made of S960Q conventional	21
Figure 11 Hardness distribution (HV1) and micrographs of the impact dies made of S960Q LTT-welded	22
Figure 12 Hardness distribution (HV1) and micrographs of the LTT-welded joint forms made of S355J2+N and S960Q LTT with HFMI and TIG weld seam post-treatment	23
Figure 13 Measurement setup for recording the seam geometry profile measurement in the middle of the sample longitudinal direction	24
Figure 14 Angular distortion determined from the seam height profile before and after straightening, S355 J2+N conv. (left) and LTT-welded (right)	25
Figure 15 Angular distortion determined from the seam height profile before and after straightening, S960QL conv. (left) and LTT-welded (right)	25

Figure 16 Seam flank angle determined from the seam height profile of the examined joint shapes made of S355J2+N (top) and S960Q (bottom). NÜ: seam transition, NW: seam root	26
Figure 17 Proportion of Cr and Ni in the LTT weld metal as a function of the shielding gas	28
Figure 18 Impact energy of the LTT weld metal as a function of the shielding gas	29
Figure 19 Cross-sections with hardness profiles of the LTT weld metal and paths of the WDX element analysis, a) butt joint with V seam, b) butt joint with DY seam, c) cross joint with HV seam, d) lap joint with fillet weld	30
Figure 20 Calculation of the Ms temperature based on the element distribution along the paths outlined in Figure 6 according to [26], a) butt joint with V seam, b) butt joint with DY seam, c) cross joint with HV seam, d) lap joint with fillet weld	31
Figure 21 Longitudinal a) and transverse residual stresses b) in the surface of the butt joints with V-seam, material S355+LTT-addition; comparison after welding (sheet metal) and after cutting out the vibration test specimen	32
Figure 22 Longitudinal a) and transverse residual stresses b) in the surface of the butt joints with V-seam, material S960+LTT-addition; comparison after welding (sheet metal) and after cutting out the vibration test specimen	33
Figure 23 Longitudinal a) and transverse residual stresses b) in the surface of the butt joints with DY seam, backing, material S960+LTT addition; comparison after welding (sheet metal) and after cutting out the vibration test specimen	34
Figure 24 Longitudinal a) and transverse residual stresses b) in the surface of the butt joints with DY seam, layer 1, material S960+LTT addition; comparison after welding (sheet metal) and after cutting out the vibration test specimen	34
Figure 25 Overview of the "2-MN test facility" a), with clamped specimen b)	36
Figure 26 Cross-section with hardness profile of the sample welded in the top layer with LTT addition and paths of the WDX- element analysis	39
Figure 27 Ms temperature calculation based on the element distribution along the paths outlined in Figure 26[26]	40
Figure 28 Reaction force and temperature during welding, base material S960 with conventional additive G Mn4Ni2 CrMo (left), with LTT additive in the beads 6- 8 (top layer) (right)	41
Figure 29 Reaction force and temperature during welding of the 8th bead, base metal S960 with conventional additive G Mn4Ni2 CrMo (left), LTT- Addition(right)	41
Figure 30 Longitudinal a) and transverse residual stresses b) in the surface of the butt welds with V-weld, sheet thickness 25 mm, material S690+G Mn4Ni2 CrMo	42

Figure 31 Longitudinal a) and transverse residual stresses b) in the surface of butt welds with V-weld, plate thickness 25 mm, material S690+G Mn4Ni2 CrMo (layer 1-5), LTT-addition (layer 6-8)	43
Figure 32 Longitudinal, transverse and normal residual stresses in different depths according to the paths in the micrograph, butt welds with V-weld, sheet thickness 25 mm, material S690+G Mn4Ni2 CrMo (layer 1-5), LTT addition (layer 6-8)	44
Figure 33 Results of the Wöhler test on conventionally welded butt welds (V-weld) made of S355J2+N	47
Figure 34 Results of the Wöhler test on LTT-welded butt welds (V-weld) from S355J2+N	48
Figure 35 Results of the Wöhler test on conventionally welded butt welds (DY seam) made of S355J2+N	48
Figure 36 Results of the Wöhler test on LTT welded butt welds (DY weld) of S355J2+N	49
Figure 37 Results of the Wöhler test on conventionally welded cross joints of S355J2+N	50
Figure 38 Results of the Wöhler test on LTT welded cross joints made of S355J2+N	50
Figure 39 Results of the Wöhler test on lap joints conventionally welded on one side of S355J2+N	52
Figure 40 Results of the Wöhler test on one-sided LTT-welded lap joints made of S355J2+N	52
Figure 41 Results of the Wöhler test on lap joints conventionally welded on both sides of S355J2+N	53
Figure 42 Results of the Wöhler test on LTT-welded lap joints on both sides made of S355J2+N	53
Figure 43 Results of the Wöhler test on conventionally welded longitudinal stiffeners with additional conventional layer in the area of the end face made of S355J2+N	54
Figure 44 Results of the Wöhler test on conventionally welded longitudinal stiffeners with an additional LTT layer in the area of the end face made of S355J2+N	55
Figure 45 Results of the Wöhler test on LTT-welded butt welds (V-weld) from S960Q	56
Figure 46 Results of the Wöhler test on conventionally welded butt welds (DY seam) made of S960Q	56
Figure 47 Results of the Wöhler test on LTT welded butt welds (DY weld) of S960Q	57

Figure 48 Results of the Wöhler test on conventionally welded cross joints of S960Q	58
Figure 49 Results of the Wöhler test on LTT welded cross joints made of S960Q	58
Figure 50 Results of the Wöhler test on one-sided LTT-welded lap joints made of S960Q	60
Figure 51 Results of the Wöhler test on lap joints conventionally welded on both sides of S960Q	60
Figure 52 Results of the Wöhler test on LTT-welded lap joints on both sides made of S960Q	61
Figure 53 Results of the Wöhler test on conventionally welded longitudinal stiffeners with an additional LTT layer in the area of the end face made of S960Q	62
Figure 54 Results of the Wöhler test on LTT-welded butt welds (V-weld) made of S355J2+N with additional Pit weld post treatment (HFMI)	63
Figure 55 Results of the Wöhler test on LTT-welded butt joints (V-weld) made of S355J2+N with additional TIG weld post treatment	63
Figure 56 Results of the Wöhler test on LTT-welded butt welds (V-weld) made of S960Q with additional Pit weld post treatment (HFMI)	64
Figure 57 Results of the Wöhler test on LTT-welded butt welds (V-weld) made of S960Q with additional TIG weld post-treatment	65
Figure 58 Notch stress evaluation of overlap joints from S355J2+N (left) and S960Q (right). NW: seam root failure, NÜ: seam transition failure	66
Figure 59 Comparative illustration of the fatigue strength of conventional and LTT-welded connections made of S355J2+N at 2 million load cycles	67
Figure 60 Comparative illustration of the fatigue strength of conventional and LTT-welded connections made of S960Q at 2 million load cycles	68
Figure 61 Comparative illustration of the fatigue strength of LTT-welded connections made of S355J2+N and S960Q at 2 million load cycles with weld seam post-treatment HFMI (left) and TIG (right)	68
Figure 62 Measuring path for the radiographic determination of residual stress and definition of the residual stress direction (butt joint, cross joint and lap joint), top view butt joint	70
Figure 63 Measurement path for the radiographic determination of residual stress and definition of the residual stress direction, top view longitudinal stiffness	70
Figure 64 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N conv. V-seam, cover layer	71

Figure 65 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N conv. V-seam, root position	72
Figure 66 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N conv. DY seam, cover layer 1	72
Figure 67 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N conv. DY seam, cover layer 2	72
Figure 68 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N HK-seam	73
Figure 69 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N HK-seam	73
Figure 70 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N HK-seam	74
Figure 71 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S355 J2+N HK-seam	74
Figure 72 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N Lap joint, one-sided top layer/side1	75
Figure 73 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N Lap joint, both sides top layer/side1	75
Figure 74 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N Lap joint, both sides top layer/side2	75
Figure 75 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N longitudinal stiffness, top layer/side1	76
Figure 76 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S355 J2+N longitudinal stiffness, top layer/side 2	77
Figure 77 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL conv. DY seam, cover layer 1	78
Figure 78 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL conv. DY seam, cover layer 2	78
Figure 79 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL conv. HK seam, cover layer 1	79
Figure 80 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL conv. HK seam, cover layer 2	79
Figure 81 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL conv. HK seam, root position 1	80

Figure 82 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL conv. HK seam, root position 2	80
Figure 83 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL, lap joint, both sides top layer/side 1	81
Figure 84 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL, lap joint, both sides top layer/side2	81
Figure 85 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S355 J2+N LTT, V-seam, cover layer	82
Figure 86 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S355 J2+N LTT, V-seam	83
Figure 87 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S355 J2+N LTT, DY seam, cover layer 1	83
Figure 88 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S355 J2+N LTT, DY seam, cover layer 2	83
Figure 89 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) 355 J2+N LTT HK seam	84
Figure 90 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) 355 J2+N LTT HK seam; top layer side 2	85
Figure 91 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) 355 J2+N LTT HK seam; root position side 1	85
Figure 92 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) 355 J2+N LTT HK seam; root position side 2	85
Figure 93 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S355J2+N LTT lap joint one-sided; side 1	86
Figure 94 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S355J2+N LTT lap joint on both sides; side 1	86
Figure 95 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) 355 J2+N LTT lap joint on both sides; side 2	87
Figure 96 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) 355 J2+N LTT longitudinal stiffness; top layer 1	88
Figure 97 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) 355 J2+N LTT longitudinal stiffness; top layer 2	88
Figure 98 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S960QL LTT V-seam, top layer	89

Figure 99 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S960QL LTT V-seam; root layer	90
Figure 100 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S960QL LTT DY seam; cover layer1	90
Figure 101 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL LTT DY seam; cover layer2	90
Figure 102 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stress (r.) S960QL, LTT HK-seam	91
Figure 103 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stress S960QL, LTT HK-seam	92
Figure 104 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stress S960QL, LTT HK-seam	92
Figure 105 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stress S960QL, LTT HK-seam;	92
Figure 106 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S960QL LTT Lap joint, one-sided side 1	93
Figure 107 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S960QL LTT lap joint, both sides, side 1	93
Figure 108 Longitudinal residual stress (l.) and transverse residual stress (r.) S960QL LTT Lap joint, both sides, side 2	94
Figure 109 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL LTT longitudinal stiffness; side 1	94
Figure 110 Longitudinal residual stresses (l.) and transverse residual stresses (r.) S960QL LTT longitudinal stiffness; side 2	95
Figure 111 Residual stresses at butt joints (V-weld) of S355J2+N, LTT- welded and HFMI- weld post treatment (Pit)	96
Figure 112 Residual stresses at butt joints (V-weld) made of S960Q, LTT-welded and HFMI weld post treatment (Pit)	97
Figure 113 Residual stresses at butt joints (V-weld) of S355J2+N, LTT- welded and WIG-post treatment	98
Figure 114 Residual stresses at butt joints (V-weld) of S960Q, LTT-welded and WIG-post treatment	99
Figure 115 Residual stress (top) and integral width (bottom) curves on a longitudinal stiffener (S355J2+N; conv.) under tensile stress at different loads	101

Figure 116 Residual stress (top) and integral width (bottom) curves on a longitudinal stiffener (S355J2+N; LTT) under tensile stress at different loads 103

Figure 117 Residual stress (top) and integral width (bottom) curves on a longitudinal stiffener (S960QL; LTT) under tensile stress at different loads 104

Figure 118 Cyclical residual stress relief at a longitudinal stiffener (S355J2+N; LTT) under the load $R=0.1$, $\sigma_o = 160$ MPa 106

Figure 119 Cyclical residual stress relief at a longitudinal stiffener (S355J2+N; LTT) under the load $R=0.1$, $\sigma_o = 260$ MPa 106

Figure 120 Cyclical residual stress relief on a longitudinal stiffener (S690QL; LTT), $\sigma_o = 400$ MPa 107

List of tables

Table 1 Chemical composition of the basic and filler material.	14
Table 2 Mechanical properties of the basic and filler material	14
Table 3 Welding process parameters	17
Table 4 Parameters of the radiographic Stress Analysis	28
Table 5 Performance characteristics of the 2-MN- Test system	37
Table 6 Welding parameters and Temperature control	37
Table 7 Measurement and evaluation parameters of neutronographic stress analysis	38

1 Einleitung Introduction

Kurzzusammenfassung

Low Transformation Temperature (LTT-) Zusatzwerkstoffe stellen einen eleganten Ansatz dar, die Eigenspannungen schon während des Schweißens hochfester Stähle zu optimieren. Die martensitische Phasenumwandlung bei relativ niedrigen Temperaturen, wirkt sich stark auf die Eigenspannungen aus. Sogar Druckeigenspannungen können hierbei erzeugt werden. Der grundsätzliche Nachweis der Wirkung wurde bereits in einigen Studien erbracht. In der vorliegenden Arbeit wurde bewertet, ob der Einsatz von LTT-Schweißzusatzwerkstoffen zur Schwingfestigkeitsverbesserung geschweißter Konstruktionen aus hochfestem Stahl führt. Dabei wurde eine systematische Untersuchung des Einflusses der während des Schweißens eingebrachten Druckeigenspannungen auf die Schwingfestigkeit durchgeführt.

Abstract

Low Transformation Temperature (LTT) filler materials represent a smart engineering approach to optimize the residual stresses already during welding of high-strength steels. The martensitic phase transformation at relatively low temperatures has a strong effect on the residual stresses. Even compressive residual stresses can be generated. The basic proof of the effect has already been provided in several studies. In the present work it was evaluated whether the use of LTT welding consumables leads to an improvement of the fatigue strength of welded constructions made of high-strength steel. A systematic investigation of the influence of the compressive residual stresses introduced during welding on the fatigue strength was carried out.

1.1 Problemstellung Problem definition

Hochfeste Feinkornbaustähle werden verstärkt in Branchen wie dem Anlagen-, Hoch- und Kranbau zum Einsatz gebracht. Die Anwendung resultiert aus den Bestrebungen zum Leichtbau. Durch die Verarbeitung hochfester Feinkornbaustähle ($R_{p0.2} \geq 690$ MPa) in modernen Stahlkonstruktionen können durch Wandstärkenreduktion beachtliche Gewichtsminderungen und herabgesetzte Lohn- und Fertigungskosten erreicht werden [1]. Gleichzeitig spart der innovative Stahleinsatz im Schnitt bis zu sechsmal so viel klimaschädliches CO₂ ein wie seine Produktion verursacht [2].

Die Nutzbarkeit hochfester Feinkornbaustähle wird durch die Lebensdauer der Schweißverbindungen unter wechselnder zyklischer Belastung limitiert. So ergeben sich für unbehandelte MAG-Stumpfnahverbindungen der Werkstoffe S355J2G3, S690Q und S890Q in Abhängigkeit der Beanspruchungsart vergleichbare Dauerfestigkeiten nur unterhalb der Dauerfestigkeit des Grundwerkstoffes S355J2G3G3 [3]-[4]. Damit kommt der Festigkeitsvorteil nicht zum Tragen bzw. bedingt die Verlagerung der Schweißverbindungen in Konstruktionsbereiche mit geringerer Beanspruchung [5]. Die Wirksamkeit thermischer und mechanischer Nachbehandlungsverfahren hinsichtlich

der Schwingfestigkeitserhöhung ist in Wissenschaft und Praxis hinreichend bekannt [6]. Neben den etablierten Oberflächennachbehandlungsverfahren stellen neuartige LTT-Schweißzusatzwerkstoffe (Low Transformation Temperature) eine vielversprechende Alternative dar, maßgebliche Schwingfestigkeitsverbesserungen ohne zusätzliche Nachbehandlungsmaßnahmen zu erzielen. Die Wirkung dieser speziellen Werkstoffe beruht auf der definierten Erzeugung von Druckeigenstressungen in der Schweißnaht und in angrenzenden Werkstoffbereichen aufgrund der martensitischen Phasenumwandlung bereits während des Schweißens. Durch den Verzicht auf jegliche Nachbehandlungsverfahren können die Fertigungskosten und -zeiten von Schweißkonstruktionen bei gleichzeitig steigender Beanspruchbarkeit gesenkt werden. Darüber hinaus können diese Zusätze zur Instandhaltung und Lebensdauererweiterung existenter Stahlbauwerke dienen [7]. Hervorzuheben ist vor allem, dass die für die Schwingfestigkeit günstigen Druckeigenstressungen im gesamten Schweißgut erzeugt werden können. Dadurch wird die vor allem bei Kehlnahtverbindungen oft kritische Nahtwurzel (unverschweißter Spalt) miteingefasst. Klassische Nachbehandlungsverfahren wie das Hämmern oder Wiederaufschmelzen der Nahtkanten erreichen diese Stellen nicht, weshalb diese Methoden dann oft wirkungslos sind, weil bei außenseitiger Behandlung der zugänglichen Stellen der Bruchausgang dann bei kaum veränderter Beanspruchbarkeit in die Wurzel verschoben wird.

Low Transformation Temperature (LTT-)Schweißzusätze sind bisher nicht kommerziell verfügbar. Eher grundlagenorientierte Untersuchungen waren bislang wenigen Forschungsstellen vorbehalten [8]-[12]. Der Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft bedarf jedoch der Bewertung des Werkstoffeinsatzes anhand praxisrelevanter Fügeverbindungen, um dem branchenübergreifendem Anwenderkreis sichere Verarbeitungsregeln zur Verfügung zu stellen. Nur so kann das Potential der LTT-Zusatzwerkstoffe optimal genutzt werden und zu Wettbewerbsvorteilen führen.

In der vorliegenden Arbeit sollte bewertet werden, ob der Einsatz von LTT-Schweißzusatzwerkstoffen zur Schwingfestigkeitsverbesserung geschweißter Konstruktionen führt. Dabei wurde eine systematische Untersuchung des Einflusses der während des Schweißens eingebrachten Druckeigenstressungen auf die Schwingfestigkeit durchgeführt.

1.2 Motivation Motivation

Das Schweißen mit neuartigen LTT-Zusatzwerkstoffen stellt eine neue Methode dar, die zu einer signifikanten Verbesserung der Festigkeitseigenschaften und der Betriebssicherheit hochbeanspruchter Schweißkonstruktionen führt. Die Vorteile des Verfahrens gegenüber herkömmlichen Nachbehandlungsverfahren eröffnen neben der besseren Wirtschaftlichkeit im Besonderen die Möglichkeit, in bisher unzugänglichen risskritischen Bereichen positive Druckeigenstressungen zu erzeugen und damit Lebensdauererweiterungen herbeizuführen. In diesem Zusammenhang ist auch die nachträgliche Anwendung der LTT-Zusätze an Schweißverbindungen bestehender Konstruktionen, hinsichtlich der Erzeugung lebensdauererweiternder (Druck-) Eigenstresszustände, als zielführend einzuschätzen.

1.3 Zielsetzung Objective

Obwohl bisherige Forschungsergebnisse die prinzipielle Wirksamkeit des LTT-Konzeptes anhand nachgewiesener Druckeigenstressungen in Schweißverbindungen bestätigen, blieb dies an praxisrelevanten Beispielen zu bestätigen und entsprechende Verarbeitungsempfehlungen abzuleiten. Das übergeordnete Forschungsziel war die Klärung der Frage, inwieweit die spezifischen Eigenschaften von LTT-Werkstoffen geeignet sind, die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen nachhaltig zu steigern. Zwei Fragenkomplexe wurden im Vorhaben untersucht.

A) Schweißbarkeit der LTT-Werkstoffe (BAM)

Der Antragsteller der BAM setzte sich zum Ziel, die praxissichere Schweißbarkeit der Werkstoffe auch unter Bauteilbedingungen mit hoher Einspannwirkung sicherzustellen sowie Handhabungsregeln aufzustellen. Dies beinhaltet ferner die Bewertung von Mischverbindungen mit LTT-Zusätzen und konventionellen Schweißzusatzwerkstoffen in Mehrlagenschweißungen und die Übertragbarkeit auf bestehende Schweißkonstruktionen (Reparaturfall).

B) Schwingfestigkeit und Eigenspannungsstabilität (ifs)

Der Antragsteller des ifs widmete sich dem Ziel, den Nutzen der LTT-Werkstoffe für die Schwingfestigkeit sowohl bei konventionellen Stählen (Ertüchtigung und Instandsetzung) als auch bei hochfesten Stählen (Gewichts-, Schadstoff- und Kosteneinsparung bei Neubauten) zu klären. Es ist die Frage zu beantworten, inwieweit sich die mit dem LTT-Effekt verbundenen Druckeigenstressungen ausnutzen lassen, um kosten- und zeitintensive Nachbehandlungsverfahren zu ersetzen bzw. die Beanspruchbarkeit kritischer Schweißnahttypen erheblich zu verbessern.

2 Stand der Technik State of the art

Kurzfassung

Durch die Verarbeitung hochfester Feinkornbaustähle in modernen Stahlkonstruktionen können durch Wandstärkenreduktion beachtliche Gewichtsminderungen und herabgesetzte Lohn- und Fertigungskosten erreicht werden. Die Nutzbarkeit hochfester Feinkornbaustähle wird allerdings durch die Festigkeit der Schweißverbindungen unter wechselnder zyklischer Beanspruchung limitiert. Maßgebliche Schwingfestigkeitsverbesserungen solcher Verbindungen lassen sich durch die etablierten Oberflächennachbehandlungsverfahren erzielen. Eine vielversprechende alternative Methode bietet sich mit dem Einsatz neuartiger LTT-Schweißzusatzwerkstoffe (Low Transformation Temperature). Die Wirkung dieser speziellen Werkstoffe beruht auf der definierten Einbringung von Druckeigenstressungen in der Schweißnaht und in angrenzenden Werkstoffbereichen aufgrund der martensitischen Phasenumwandlung bereits während des Schweißens.

Abstract

High-strength steels are increasingly applied in modern steel structures by a considerably rising number of industry sectors. By reducing the wall thickness, remarkable weight savings and lower processing costs are achievable. Nevertheless, the use of high strength steels is limited due to the fatigue strength of the welded components. In the past few years developments have been made improving post weld treatment techniques to increase the fatigue strength of welded joints. Instead of post weld treatments the usage of LTT (Low Transformation Temperature) filler materials could be beneficial by reducing residual tensile stresses or even generating compressive stresses within the weld and heat affect zone by means of martensite transformation during welding.

2.1 Problemstellung Problem definition

2.1.1 Theoretischer Hintergrund Theoretical background

Neben den etablierten Oberflächennachbehandlungsmethoden kann gerade durch die Ausnutzung von Druckeigenstressungen, die bereits während der schweißtechnischen Fertigung eingebracht werden, eine maßgebliche Verbesserung der Schwingfestigkeit erzielt werden. Aufwendige Nachbehandlungen und damit einhergehende Kosten können so vermieden werden.

Der originäre Ansatz, einen Schweißzusatzwerkstoff gezielt zur Erzeugung von Druckeigenstressungen einzusetzen, geht auf Ohta et al. [10] zurück. Diese Forschergruppe zeigte erste experimentelle Befunde zum Einsatz von Legierungen mit speziell abgesenkten Ms-Temperaturen zur Eigenspannungskontrolle, vorrangig mit der Absicht, die Schwingfestigkeit zu erhöhen. Es wurde ein Schweißzusatzwerkstoff auf Basis einer Eisen-Chrom-Nickel-Legierung als Massivdraht entwickelt. Aufgrund der che-

mischen Zusammensetzung zeigt dieser Werkstoff eine martensitische Phasenumwandlung bei $M_s = 180\text{ °C}$. Neben Autoren, die diesen Ansatz aufgriffen, existieren auch Veröffentlichungen mit alternativen chemischen Zusammensetzungen. So wurde in [11] das Element Nickel durch Mangan substituiert. Auch ein Ansatz unter der alleinigen Verwendung von Nickel wurde verfolgt [12].

Trotz einer Vielzahl von Publikationen blieb ein kommerzieller Einsatz dieser Werkstoffe bisher aus. Dies ist vor allem der immer noch mangelnden Kenntnis der Eigenspannungsverteilung in praxisrelevanten Anwendungsfällen geschuldet. Bislang erlaubt der Wissensstand keine Vorhersage der Höhe und Verteilung der Eigenspannungen beim Schweißen mit LTT-Zusätzen unter variierenden Randbedingungen. Demzufolge lassen sich bisher auch keine Schlüsse zur Schwingfestigkeitsbeeinflussung ziehen. Entsprechende Kenntnisse sollen daher im vorliegenden Forschungsvorhaben erstmals systematisch erarbeitet werden.

Hinzu kommt das die hochlegierten LTT-Zusätze aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung generell das Risiko der Heißrissbildung bergen. Gerade austenitstabilisierende Elemente (z. B. Nickel), welche zur Absenkung der M_s -Temperatur nötig sind, ziehen eine austenitische Erstarrung der Schmelze verbunden mit einem charakteristischen Mikroseigerungsverhalten nach sich. Leider fördert dies auch die Erstarrungsrissbildung. Zudem verfügen rein martensitische Gefüge nur über vergleichsweise geringe Duktilität sowie auch Kerbschlagzähigkeit. Die bisher vorgestellten Ansätze fokussierten vorrangig auf die Einstellung des Umwandlungsverhaltens und vernachlässigten zunächst die Begleiteigenschaften. Daher wird die Herleitung entsprechender Verarbeitungsempfehlungen ein wichtiger Bestandteil des hier geplanten Forschungsvorhabens sein. Relevante Patente, welche das Thema LTT-Zusätze thematisieren, sind den Antragstellern nicht bekannt.

Die Herstellung der LTT-Zusätze erfolgte in den meisten Fällen als umhüllte Stabelektrode oder Metallpulverfülldraht. Diese Formen des Schweißzusatzes lassen eine vergleichsweise einfache Anpassung der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes zu bzw. erlauben spezifische Verbesserungen durch gezieltes Legieren. Weiter ergeben sich wirtschaftliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Massivdrähten bei Betrachtung der gesamten Prozesskette. Metallpulverfülldrähte weisen ein verbessertes Abbrandverhalten sowie erhöhte Abschmelzleistungen bei gleichbleibender Schweißnahtgüte auf und tragen somit zur Kostensenkung bei [13].

Erste experimentelle Befunde zur Steigerung der Schwingfestigkeit durch den Einsatz von LTT-Schweißzusatzwerkstoffen mit abgesenkter martensitischer Umwandlungstemperatur finden sich beispielsweise in [9][10][14]. So wurden von Ohta et al. [10] an Überlappverbindungen bei Stählen mit Streckgrenzen von 540 MPa und 780 MPa durch die Verwendung eines LTT-Zusatzwerkstoffes Schwingfestigkeitssteigerungen ($R = 0$) zwischen 40 % und 60 % erreicht (vgl. Abbildung 1). Die parallel mit einem Zerlegeverfahren ermittelten Eigenspannungen verdeutlichen bei beiden Grundwerkstoffen die Auswirkung der Umwandlungstemperatur, die im Schweißgut in den Randschichten durchweg zu Druckeigenspannungen führt (vgl. Abbildung 2). Dass die erhöhte Schwingfestigkeit eine Folge der erzeugten Druckeigenspannungen ist, lässt sich daraus ableiten, dass die Verbesserungen besonders im Bereich hoher Schwing-

spielzahlen zu verzeichnen und bei kürzeren Lebensdauern kleiner oder gar nicht vorhanden waren. Dies ist ein Verhalten, wie es für niedrigfeste Stähle auch nach mechanischen Oberflächenbehandlungen bekannt ist. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass bei hohen Beanspruchungen die Druckeigenspannungen durch zunehmende Plastizierungen bereits nach wenigen Lastwechseln merklich verringert werden können, während bei niedrigeren Beanspruchungen stabile Eigenspannungen vorliegen. Deshalb wirken sich Eigenspannungen bei höherfesten Werkstoffen stärker aus als die mit den Plastizierungen verbundenen Verfestigungen. Weitere Beispiele für die Wirksamkeit des Einsatzes von LTT-Zusatzwerkstoffen finden sich in der Arbeit von Wang et al. [9] (vgl. Abbildung 3).

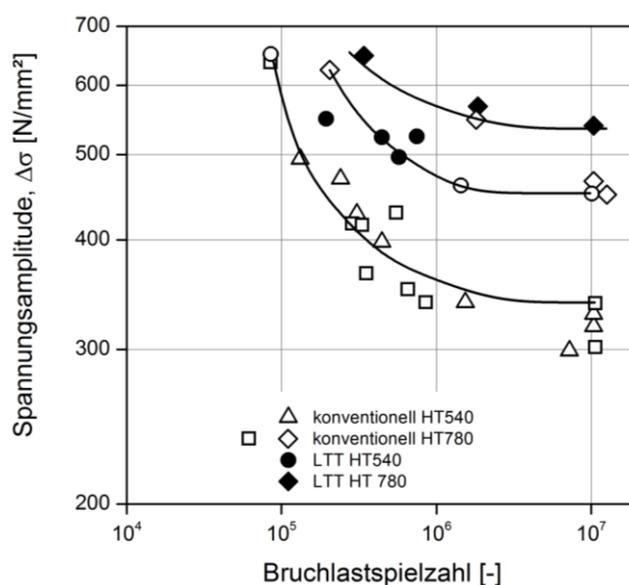


Abbildung 1 Schwingfestigkeit von Baustählen mit unterschiedlicher Streckgrenze nach dem LBH-Schweißen mit konventionellen und mit LTT-Elektroden, nach [14]

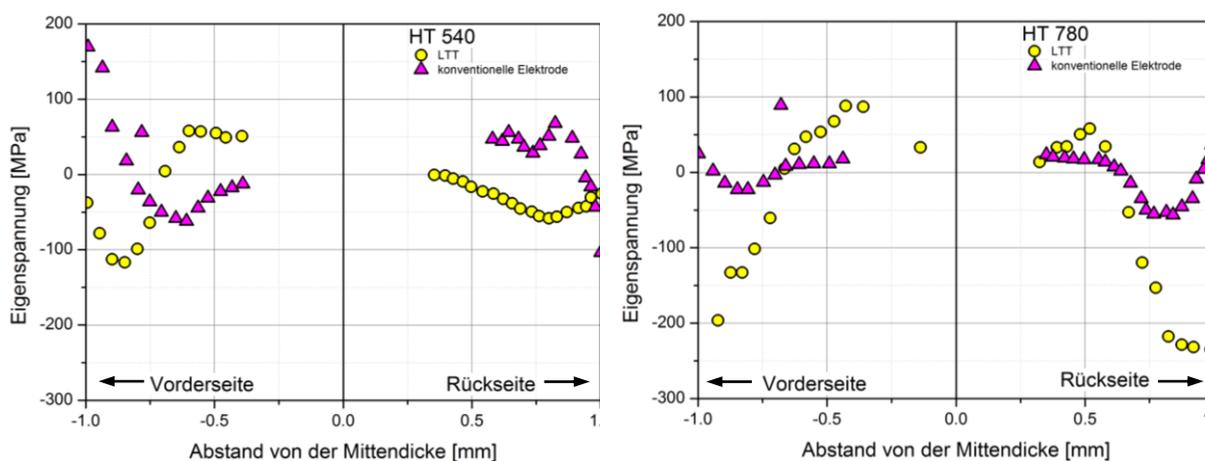


Abbildung 2 Eigenspannungen an Überlappverbindungen zweier Baustähle mit $Re = 540$ MPa (links) und $Re = 780$ MPa (rechts) nach dem LBH-Schweißen mit konventionellen und mit LTT-Stabelektroden, nach [14]

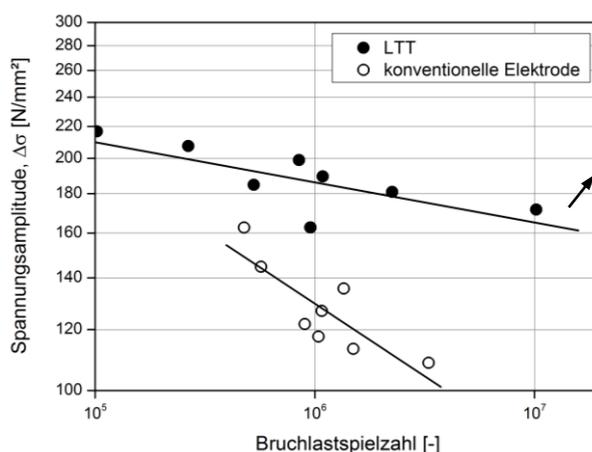


Abbildung 3 Schwingfestigkeiten eines Baustahls ($R_e = 235$ MPa) geschweißt mit konventionellen und mit LTT-Stabelektroden [9]

Untersuchungen, die sich dem Reparaturschweißen von hochfesten Schweißkonstruktionen mit Hilfe von LTT-Schweißzusatzwerkstoffen widmen, bestätigen ebenso deren Effektivität. So konnte von Ohta et al. [15] an längsgeschweißten Anschlussblechen des Grundwerkstoffes SM570Q gezeigt werden, dass das Reparaturschweißen mit Hilfe von LTT-Schweißzusatzwerkstoffen möglich ist und zu einer Verbesserung der Schwingfestigkeit um bis zu 40 % – 50 % führt.

LTT-Schweißzusatzwerkstoffe sind bisher nicht kommerziell verfügbar. Obwohl deren positive Wirkung auf den Schweißeigenspannungszustand nachgewiesen wurde [8], existiert hier nach wie vor Forschungsbedarf. Dies betrifft vor allem die Übertragbarkeit der bisher gewonnenen Ergebnisse. Die an Laborversuchen beobachteten Phänomene können nur eingeschränkt auf geschweißte Bauteile unter realen Fertigungsbedingungen übertragen werden. Die Übertragbarkeit ist nur dann gewährleistet, wenn eine hohe Probenanalogie vorliegt, verbunden mit realitätsnahen Wärmeleitungsbedingungen und Einspanngraden sowie bei mehrlagigen Schweißnähten [16]. Bereits in [17] konnte beim Mehrlagenschweißen einer Stumpfstoßverbindung mit Hilfe von LTT-Schweißzusatzwerkstoffen gezeigt werden, dass die Einspannbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Schweißeigenspannungen in der Schweißnaht sowie in der WEZ haben. Die Martensitentstehung jeder Schweißbraupe ist mit einem Spannungsabbau verbunden, der von der Menge des umwandelnden Volumens abhängig ist. Während die Längseigenspannungen der Schweißnaht geringe Zugeigenspannungen aufweisen, werden die Quereigenspannungen an der Oberfläche wesentlich durch die äußere Schrumpfbehinderung mitbestimmt (vgl. Abbildung 4). Hingegen ist im Schweißnahtvolumen solcher Verbindungen mit ausgeprägten Druckeigenspannungen zu rechnen [12][18][19]. Die Ergebnisse belegen, dass die konstruktiven und prozessspezifischen Randbedingungen (Wärmeführung) bei der Bewertung zu berücksichtigen sind und keinesfalls generell von „hohen“ Druckeigenspannungen in der Schweißnaht und in der WEZ ausgegangen werden darf.

Für die Schwingfestigkeit einer Schweißverbindung ist letztlich entscheidend, welcher Widerstand gegen Bildung und Ausbreitung von Ermüdungsrissen an Stellen mit besonderen Spannungskonzentrationen vorliegt. Dabei kommt der Höhe und Verteilung der lokal stabil vorliegenden Eigenspannungen eine entscheidende Bedeutung zuteil,

da nur diese festigkeitsrelevant wirken können. In eigenen Untersuchungen der Antragsteller konnte gezeigt werden, dass die beim Schweißen erzeugten Eigenspannungen unter quasi-statischer Belastung prinzipiell erhalten bleiben. Die Untersuchungen wurden an Quersugproben zweilagiger Schweißverbindungen des hochfesten Feinkornbaustahls S690Q unter Verwendung verschiedener LTT-Zusatzwerkstoffe durchgeführt [20]. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit Untersuchungen zur Eigenspannungsrelaxation an geschweißten Längssteifen [21]. Festzuhalten bleibt, dass im Gegensatz zu konventionellen Oberflächennachbehandlungen sich bei einer metallurgischen Beeinflussung die mit Druckeigenspannungen behaftete Zone über weite Bereiche des Schweißgutvolumens erstrecken kann. Eingehende Untersuchungen über die Verteilung der entstehenden Eigenspannungen, deren Zusammenhang mit der temperaturabhängigen Mikrostruktur und der daraus resultierenden Eigenspannungsstabilität bei zügiger und zyklischer Beanspruchung fehlen jedoch bislang.

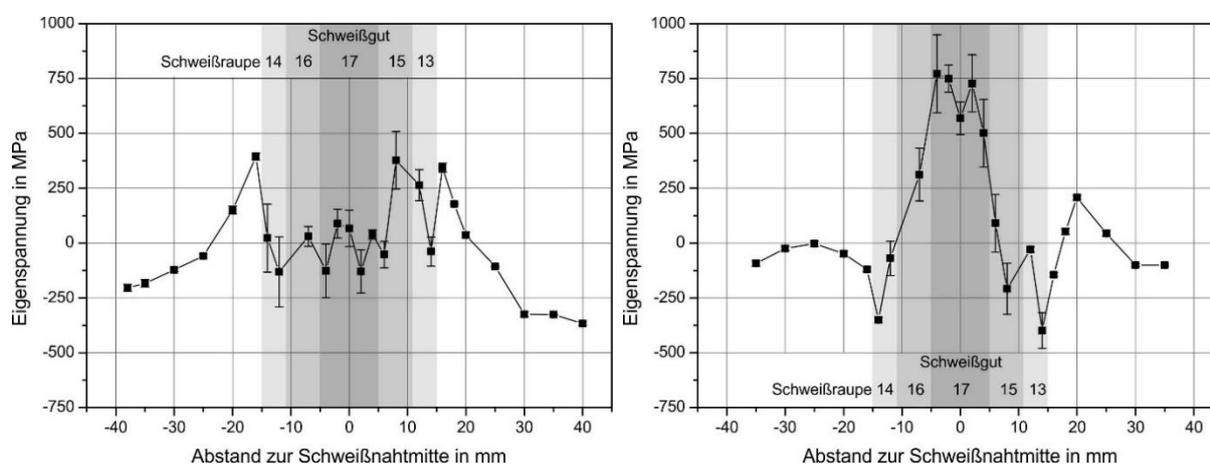


Abbildung 4 Längs- (links) und Quereigenspannungen (rechts) in der Oberfläche einer 20-mm-Mehrlagenstumpfnahntverbindung aus S355 geschweißt mit einem LTT-Zusatzwerkstoff

Daher sind bis jetzt keine verlässlichen Aussagen über die zu erwartenden Lebensdauererhöhungen unterschiedlicher Schweißverbindungen bei LTT-Einsatz verfügbar. Zudem liegen bisher keine Kenntnisse über eine Kombination von LTT-Schweißzusätzen mit konventionellen hochfesten Schweißzusätzen vor, wie sie jedoch aus ökonomischer Sicht unabdingbar sind. Dies betrifft vor allem die lokale Anwendung solcher Zusätze in risskritischen Bereichen wie der Schweißnahtwurzel oder auch als zusätzlich aufgebrauchte Lage angrenzend an schwingbruchrelevante Übergangsbereiche zwischen Decklage und WEZ.

Obwohl bisherige Forschungsergebnisse die prinzipielle Wirksamkeit des LTT-Konzeptes anhand nachgewiesener Druckeigenspannungen in Schweißverbindungen bestätigen, bleibt dies an praxisrelevanten Beispielen zu bestätigen und entsprechende Verarbeitungsempfehlungen abzuleiten. Dies ist Anlass des Forschungsvorhabens und begründet die Zusammenarbeit der beiden antragstellenden Forschungsstellen, wobei die gewonnenen Erfahrungen in der LTT-Entwicklung idealerweise mit Kenntnissen zur Schwingfestigkeitsbewertung geschweißter Komponenten zusammengeführt werden.

Als grundlegende Voraussetzung für die industrielle Anwendung ist ein tiefgreifendes Verständnis der relevanten Mechanismen beim praxisrelevanten Einsatz solcher LTT-Zusatzwerkstoffe notwendig, um die Schweißbarkeit gewährleisten zu können. Darauf aufbauend muss die Kenntnis für die Zusammenhänge der Eigenspannungsentstehung, der Mikrostruktur, der daraus resultierenden Schwingfestigkeit und der davon abhängigen Eigenspannungsstabilität geschaffen werden. Vor dem Hintergrund des praxisnahen Einsatzes an geschweißten Konstruktionen ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass neben den aus lokalen Schrumpf- und Umwandlungsvorgängen in der unmittelbaren Schweißnahtumgebung resultierenden Eigenspannungen zusätzliche Beanspruchungen aufgrund der Struktursteifigkeit der Bauteile berücksichtigt werden müssen [22]. Bisher liegen hierzu keine fundierten Kenntnisse für LTT-Zusatzwerkstoffe vor.

3 Vorgehensweise und Versuchsplanung **Approach and design of experiments**

Abstract

The experimental approach is divided into six coordinated work steps:

- 1. Optimization of welding parameters*
- 2. Welding of specimens for fatigue testing*
- 3. Fatigue testing*
- 4. Determination and Evaluation of residual stresses*
- 5. Stress analysis under restraint*
- 6. Component welding and fatigue testing (longitudinal stiffener)*

3.1 Vorgehensweise **Approach**

Die angestrebten Ergebnisse umfassten aus wissenschaftlich-technischer Sicht zunächst die jeweilige Eigenspannungsverteilung an versagensrelevanten Werkstoffbereichen unterschiedlicher Schweißverbindungen. Dafür wurden ausgewählte Schweißungen typischer Konstruktionsdetails nach Eurocode 3 [23] verwirklicht. Bevor die Eigenspannungen röntgenografisch erfasst wurden, sind geeignete Schweißparameter für die verwendeten LTT-Zusätze systematisch erarbeitet und anhand der Nahterscheinung und mikrostruktureller Merkmale bewertet sowie mögliche Abhängigkeiten von der Wärmeleitung und dem Lagenaufbau untersucht worden. Anschließende Schwingfestigkeitsuntersuchungen der zunächst bewusst einfachen Schweißproben unter variablen Beanspruchungen lieferten grundlegende Lebensdauererkennwerte im Vergleich mit konventionell hergestellten Schweißverbindungen. Die Eigenspannungsverteilung und die -stabilität der optimierten Verbindungen wurden während der nachfolgenden Schwingversuche dokumentiert, um Aussagen zur Beständigkeit der Eigenspannungen auf das Schwingfestigkeitsergebnis zu erhalten.

Im weiteren Vorgehen wurden die geschweißten Proben in ihrem Komplexitätsgrad erhöht. Das heißt, mehrlagige Verbindungen wurden in Kombination mit konventionellem hochfesten Schweißgut verwirklicht. Zudem wurden Bauteilschweißversuche in einer speziellen Prüfeinrichtung realisiert. Dabei wurde auf die Kombination von LTT-Zusatz und konventionellem Zusatz in einer Schweißnaht fokussiert und die Spannungsentstehung analysiert.

Schließlich soll die Möglichkeit der nachträglichen Einbringung von LTT-Zusätzen an risskritischen Stellen anhand bauteilähnlicher Proben bewertet werden. Dieser Reparaturfall sollte zeigen, ob die ergänzende Verwendung der LTT-Werkstoffe zur Ertüchtigung bestehender Konstruktionen zu einer nachhaltigen Lebensdauererlängerung beitragen kann.

Aus ökonomischer Sicht sollen die Untersuchungen anhand der erreichten Lebensdauererkennzahlen zeigen, ob der LTT-Einsatz prinzipiell eine potentielle Alternative zu etablierten Nahtnachbehandlungsverfahren darstellt. Zudem soll überprüft werden, ob die

Präsenz vergleichsweise großer volumenhafter Druckeigen Spannungsfelder, wie sie das LTT-Konzept erwarten lässt, zu Lebensdauererhöhung und damit wirtschaftlichen Vorteilen gegenüber oberflächenbasierten Nahtnachbehandlungen führt. Im Besonderen sollte auch eruiert werden, ob die lokale Anwendung, d. h. in der Wurzellage, eine gezielte örtliche Schwingfestigkeitsverbesserung herbeiführt, die mit anderen Verfahren so nicht möglich ist und damit einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil bietet.

3.2 Durchgeführte Untersuchungen Conducted experiments

Die durchgeführten Untersuchungen gliedern sich in sechs aufeinander abgestimmte Arbeitsschritte:

Arbeitsschritt 1: BAM/ifs – Schweißparameteroptimierung

Im ersten Schritt wurden zunächst die Randbedingungen für die Versuche mit Unterstützung des PA festgelegt. Dazu zählen die Auswahl des Grundwerkstoffes, der Schweißzusatzwerkstoffe sowie der untersuchenden Verbindungarten. Die Festlegung der Blechdicke und Nahtvorbereitung erfolgte ebenfalls in Absprache mit dem PA. Als Schweißzusatzwerkstoffe werden neben einem LTT-Zusatz (Typ CrNi) auch jeweils auf die Grundwerkstofffestigkeit angepasste konventionelle Zusatzwerkstoffe ausgewählt. Die konventionell geschweißten Verbindungen dienten als Vergleichsproben. Um eine hohe Nahtgüte hinsichtlich der im Projekt vorgesehenen Schwingversuche zu erzielen, bedarf es zuvor der systematischen Optimierung der Schweißparameter. Neben der Anpassung der Schweißprozesskennlinien kommt vor allem der Adaption der Wärmeleitung (Streckenergie) eine besondere Bedeutung zu. Weiterhin werden die Verbindungen hinsichtlich Gefüge und Härte beurteilt.

Arbeitsschritt 2: BAM/ifs – Herstellung der Proben für die Schwingfestigkeitsprüfung

In diesem Arbeitsschritt wurden die Proben für die nachfolgende Schwingfestigkeitsprüfung am gefertigt und hinsichtlich der vorliegenden Eigen Spannungsverteilungen charakterisiert. Hier ist unter Anwendung der im ersten Arbeitsschritt erarbeiteten Parameter eine hohe reproduzierbare Schweißnahtgüte sicherzustellen, um belastbare Aussagen zur Lebensdauer in Abhängigkeit der Schweißeigen Spannungen zu gewährleisten. Die Eigen Spannungen werden röntgenografisch in relevanten Probenbereichen bestimmt.

Arbeitsschritt 3: ifs – Schwingfestigkeitsanalyse

Der Schwingfestigkeitsnachweis erfolgte im Rahmen von Einstufenschwingversuchen unter Zug-Druck-Beanspruchung bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0.1$. Je Wöhlerlinie wurden ca. 16 Proben auf 4 bis 5 Spannungshorizonten bis zum Erreichen der Bruchlastspielzahl bzw. bis zur festgelegten Grenzlastspielzahl beansprucht. Die Grenzlastspielzahl muss im Hinblick auf die angestrebte Regelwerksakzeptanz mindestens $5 \cdot 10^6$ Lastwechsel umfassen, stichprobenweise wurden auch einzelne Proben

bis zu einer Lastwechselzahl von $1 \cdot 10^7$ geprüft. Neben den Wöhlerlinien wurden aus den Versuchsergebnissen auch die jeweiligen FAT-Klassen berechnet (Schnittpunkt der Zeitfestigkeitsgeraden für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97.5% mit $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln).

Bei der Durchführung der Versuche ist aufgrund der großen Eigenspannungsbedeutung ein durch Überlasten möglicher Eigenspannungsabbau zu berücksichtigen, welcher die Schwingfestigkeitsverbesserung durch den Einsatz eines LTT-Werkstoffes in der Praxis beeinflusst. Aus diesem Grunde sind Versuchsreihen vorgesehen, bei denen die solchermaßen hergestellten Proben vor Beginn der eigentlichen Schwingversuche einzelnen Überlasten ausgesetzt werden. Die dabei aufgebrauchten Nennspannungen entsprechen der Grundwerkstoffstreckgrenze und wurden sowohl als Zug-, als auch als Druckvorbeanspruchung angewendet.

Zur Bewertung der Versuchsergebnisse sind folgende begleitenden Untersuchungen zur Erfassung aller relevanten Einflussgrößen durchgeführt worden:

- 1.) Vollständige Charakterisierung aller geometrischen Einflussgrößen wie, Kantenversatz, Winkelverzug, Nahtbreite und -höhe, Wurzeldurchhang, Flankenwinkel und Kerbradius. Die außenseitige Nahtgeometrie wird mittels eines Lasertriangulationssensors ermittelt und aus den Messdaten die Nahtgeometrieparameter berechnet. Nahtgeometrieparameter werden an einer repräsentativen Zahl von Proben jeder Variante bestimmt, der Winkelverzug der Proben wird individuell an jeder Schwingprobe gemessen.
- 2.) Örtliche Dehnungsmessungen bei einsinniger Verformung zum Abgleich der rechnerisch aus den Geometriedaten bestimmten Formzahlen mit den tatsächlichen Spannungskonzentrationen.
- 3.) Kerbspannungsanalysen mittels FE-Berechnungen
- 4.) Herstellung von metallographischen Schlifften zur Bestimmung der Kerbradien im Bereich der unverschweißten Nahtwurzel. Metallographische Untersuchung der Schliffe, flächige Härtemessungen über die gesamte Schweißnaht mittels UCI-Verfahren (Vickers) und lokal hochaufgelöste Härtemessung mittels Mikroindenter (Martenshärte) im Bereich der schwingfestigkeitsrelevanten Kerbstellen.
- 5.) zerstörungsfreie Analyse der Wurzelfehler bei unvollständiger Durchschweißung mittels hochaufgelöster Computertomographie
- 6.) Röntgenographische Bestimmung der Ausgangseigenspannungen an den untersuchten Schwingproben sowie nach einsinniger Überlast im Zug- / Druckversuch. Aufnahme von Eigenspannungstiefenprofilen an ausgewählten Proben mittels Bohrlochmethode. Desweiteren kontinuierliche Verfolgung der Eigenspannungen und deren möglicher Veränderungen durch Wiederholungsmessungen mit Hilfe röntgenographischer Messungen.
- 7.) Einstufenschwingversuche zur Ermittlung der Bruchwöhlerlinien und der zugeordneten FAT-Klassen bei den nachfolgend in Tabelle 1 beschriebenen Varianten. Ermittlung der Anrisslastspielzahl mit Hilfe von in-situ-Dehnungsmessungen über die Nutzung des Steifigkeitsabfalls bei erfolgtem Anriss.

8.) Schwingversuche an einzelnen Versuchsreihen mit konventionell geschweißten Verbindungen. Diese Versuche sollen vorzugsweise an Kreuzstoßproben mit HV-Nähten erfolgen. Die Versuche dienen zur regelwerkskonformen Einordnung der Versuchsergebnisse mit LTT-Proben.

Arbeitsschritt 4: ifs – Eigenspannungsbewertung

Die Kenntnis des wurzelnahen Eigenspannungszustandes ist für die Beurteilung der Versuchsergebnisse und zum Erreichen des primären Forschungsziels von elementarer Bedeutung. Beide Forschungsstellen führten dazu zusätzlich Eigenspannungsmessungen mittels Neutronenbeugung durch.

Arbeitsschritt 5: BAM – Spannungsanalyse unter Einspannung

Die Versuche dieses Arbeitsschrittes wurden in einer speziellen Prüfeinrichtung durchgeführt, um die Spannungsentstehung beim Schweißen unter definierter Einspannung zu bewerten. Es wurden Stumpfstöße mit der Blechdicke von 25 mm genutzt. Erweiternd zu den freischumpfenden Versuchen in den ersten Arbeitsschritten werden mehrlagige Versuche durchgeführt. Dabei wurde der Lagenaufbau (LTT-Zusatz in Kombination mit konventionellem Zusatz) variiert, um einen möglichst wirtschaftlichen Einsatz der LTT-Zusätze zu erzielen. Hierbei wurde die Verwendung des LTT-Zusatzes im Bereich der Decklage analysiert. Vollständig artgleiche (nur konventioneller Schweißzusatz) vollständig „artfremde“ (nur LTT-Schweißzusatz) Schweißverbindungen dienten als Referenz.

Zur Bewertung des Einflusses der Phasenumwandlung werden die global wirkenden Reaktionskräfte analysiert. Dies erfolgt mit Hilfe der an der BAM entwickelten 2-MN-Mittellastprüfanlage. Damit kann die Spannungsentwicklung während des Schweißens einzelner Lagen analysiert und entsprechende Verarbeitungsempfehlungen erarbeitet werden.

Die Ermittlung der lokalen Eigenspannungen erfolgte nach dem Schweißen röntgenografisch. Ergänzende Mikrohärteprüfungen geben Auskunft über die lokale Festigkeit in der Schweißnaht und in der WEZ. Chemische Analysen des Schweißgutes erlauben Rückschlüsse auf Entmischungs- bzw. Abbrandverhalten.

Arbeitsschritt 6: BAM / ifs TU Braunschweig – Bauteilschweiß- und Bauteilschwingversuch

Innerhalb dieses Arbeitsschrittes werden an einer komplexen bauteilähnlichen Probe Schweißversuche und auch Schwingfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Der LTT-Zusatzwerkstoff wurde dabei als zusätzliche Lage an den Stirnseiten eines T-Stoßes mit umlaufender Kehlnaht (Längssteife) aufgebracht. Als Referenz wurde eine ausschließlich mit konventionellem Zusatz geschweißte Probe verwendet. Die Auswirkung auf die Schwingfestigkeit wurde analysiert. Dabei wurde die Eigenspannungsstabilität fortwährend mitbewertet.

3.3 Verwendete Werkstoffe Material characterisation

Die Schweißversuche erfolgten sowohl am Baustahl S355J2+N (Werkstoffnummer: 1.0577) als auch am hochfesten Feinkornbaustahl S960QL (Werkstoffnummer: 1.8933) in einer Blechstärke von jeweils 8 mm, Abbildung 5. Der LTT-Zusatzwerkstoff auf Fe-Cr-Ni-Basis wurde aufgrund der Erfahrungen vorangegangener Untersuchungen [24]-[25] ausgewählt und lag als Metallpulverfülldraht mit einem Durchmesser von 1,2 mm vor. Als Referenzzusatzwerkstoffe dienten die \varnothing 1,2 mm starken Drahtelektroden G 4Si1 bzw. G Mn4Ni2CrMo. Diese kommerziell verfügbaren Massivdrähte werden standardmäßig zum Fügen der Grundwerkstoffe S355J2 bzw. S960QL genutzt. In allen Fällen wurde das Metall-Aktivgasschweißen eingesetzt. Tabelle 1 und Tabelle 2 geben die chemischen Zusammensetzungen und die wichtigsten mechanischen Eigenschaften wieder. Die Umwandlungstemperaturen des LTT-Zusatzes wurden mit Hilfe eines Abschreckdilatometers an reinem Schweißgut ermittelt. Demnach erfolgt die Austenitisierung zwischen 730 °C und 830 °C (\pm 5 °C). Die M_s -Temperatur liegt bei 239 °C (\pm 7 °C). Der LTT-Zusatz wurde mittels standardisiertem MVT-Heißrisstest nach DIN EN ISO 17641-3:2004 als „heißrisssicher“ eingestuft.

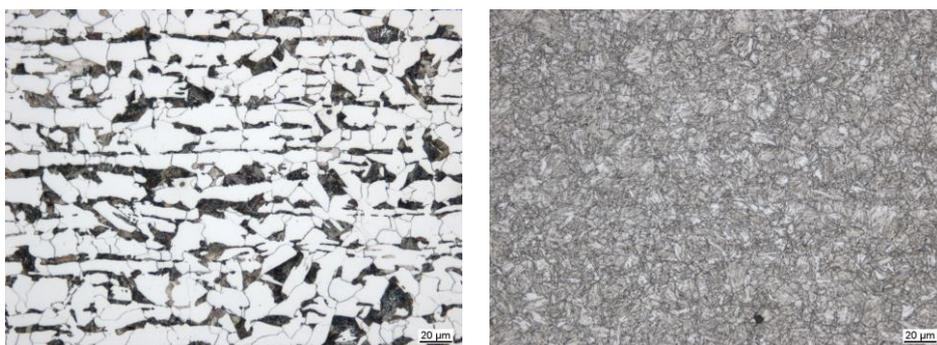


Abbildung 5 Schlifffbilder der verwendeten Grundwerkstoffe S355J2 (links) und S960QL (rechts). Ätzung Nital

Tabelle 1 Chemische Zusammensetzung der Grund- und Zusatzwerkstoffe

	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	Al	Cu	V	Nb	Ti	Fe
S355J2	0.17	1.42	0.11	0.03	0.006	0.38	0.029	0.03	0.006	0.001	0.002	Rest
S960QL	0.17	0.87	0.49	0.94	0.52	0.3	0.07	0.02	0.05	0.01	<0,01	Rest
G 4Si1	0.07	1.33	0.03	0.02	0.01	0.82	-	-	-	-	-	Rest
G Mn4Ni2 CrMo	0.07	9.45	10.34	0.04	0.05	0.38	-	-	-	-	-	Rest
LTT	0.04	0.75	12	4.7	0.03	0.41	-	-	-	-	-	Rest

Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften der Grund- und Zusatzwerkstoffe

	$R_{eH}/R_{p0.2}$ in MPa	R_m in MPa	A_{gt} in %	A in %
S355J2	422	562	-	29.6
S960QL	1017	1046	6.5	17.7
G 4Si1	530	612	-	26
G Mn4Ni2 CrMo	900	1253	4.9	14.2
LTT	944	1121	3.4	11.3

3.4 Herstellung der Schweißproben Preparation of conventionally welded specimens

Für die Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurden folgende Naht- bzw. Stoßformen in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) ausgewählt: Stumpfstoß mit V-Naht als auch DY-Naht (mit Wurzelspalt), Kreuzstoß mit HV-Naht, Überlappstoß mit einseitig und beidseitig geschweißter Kehlnaht sowie T-Stoß (Längssteife) mit umlaufender Kehlnaht. Im Falle letzterer wurde der LTT-Werkstoff als zusätzliche Umschweißung (einlagig) beidseitig im Bereich der Stirnseiten des Stegbleches aufgetragen. Die Probengeometrie und -abmessungen sind in Abbildung 6 dargestellt.

Die Schwingproben a) bis d) wurden mittels Wasserstrahlschneiden aus geschweißten Blechen der Abmessung 500 mm × 400 mm (Länge × Breite) getrennt. Jeweils vier Proben entstammen somit einem geschweißten Blech. Ein Beispiel zeigt Abbildung 7. Die Reststücke wurden für metallografische Untersuchungen genutzt. An den Längssteifen, Probe e), wurde der LTT-Zusatz erst nach vollständiger Fertigung der Schwingprobe aufgetragen.

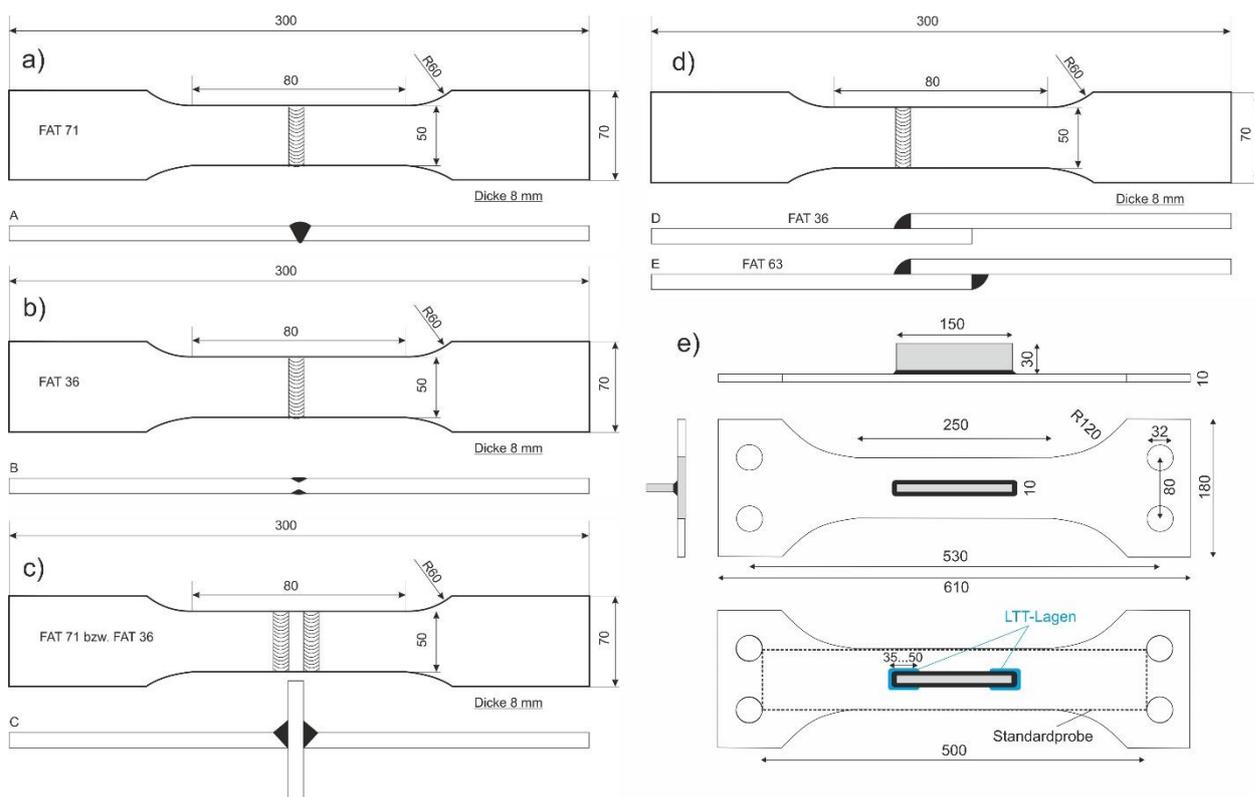


Abbildung 6 Verwendete Probenformen a) Stumpfstoß mit V-Naht, b) Stumpfstoß mit DY-Naht (mit Wurzelspalt), c) Kreuzstoß mit HV-Naht, d) Überlappstoß mit Kehlnaht (ein- und zweiseitig) sowie e) T-Stoß mit Kehlnaht (Längssteife) und LTT als Zusatzlagen

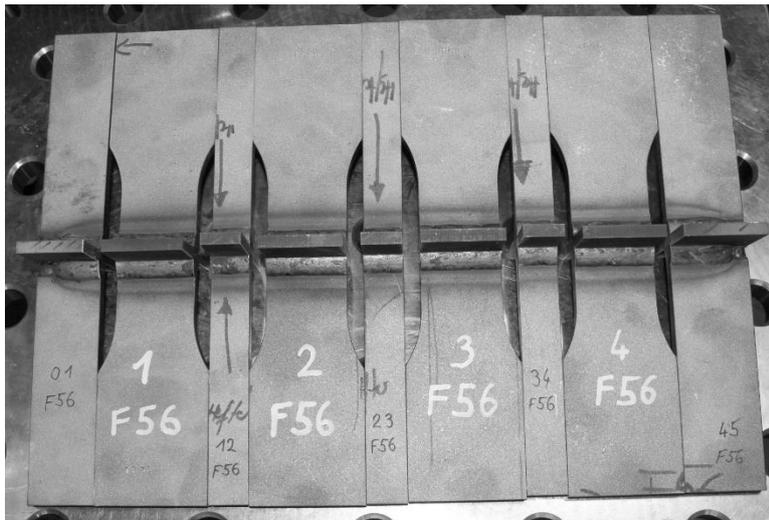


Abbildung 7 Geschweißter Kreuzstoß mit HV-Naht nach der Schwingprobenentnahme mittels Wasserstrahlschneiden

Die wichtigsten Schweißprozessparameter sind in Tabelle 3 vermerkt. Die Temperaturkontrolle während des Schweißens erfolgte durch den Einsatz mehrerer Thermoelemente. Aus den Zeit-Temperatur-Verläufen wurden die $t_{8/5}$ -Zeiten bestimmt.

Tabelle 3 Schweißprozessparameter

Konventionell geschweißte Verbindungen					
	Stumpfstoß mit V-Naht	Stumpfstoß mit DY-Naht	Kreuzstoß mit HV-Naht	Überlappstoß mit Kehlnaht (einseitig und zweiseitig)	T-Stoß (Längssteife) mit Kehlnaht (LTT-Zusatzlage)
Schweißspannung in V	31	24	31,2	30,5	28
Stromstärke in A	290	265	255	300	330
Schweißgeschwindigkeit in mm x min ⁻¹	350	400	400	490	400-600
Raupenanzahl	2	2	je 2	je 1	1
Schweißposition	PA	PA	PB	PB	
Brennerposition	0	1°	0	1°	0
Steghöhe in mm		3	0	-	
Flankenwinkel	50°	45°	50°	90°	90°
t _{8/5} -Zeit	16-18	6,1-7,1	8,4-10	5,6-5,9	6,8
T _p , T _i in °C					
LTT-geschweißte Verbindungen					
	Stumpfstoß mit V-Naht	Stumpfstoß mit DY-Naht	Kreuzstoß mit HV-Naht	Überlappstoß mit Kehlnaht (einseitig und zweiseitig)	T-Stoß (Längssteife) mit Kehlnaht (LTT-Zusatzlage)
Schweißspannung in V	28	28	31	28	28
Stromstärke in A	270	258	360	336	330
Schweißgeschwindigkeit in mm x min ⁻¹	421	550	500	500	400 - 600
Raupenanzahl	2	2	je 2	je 1	2 (je 1 Zusatzlage)
Schweißposition	PA	PA	PB (50°-60°)	PB (50°)	PB (70°)
Brennerposition	15° stechend	15° stechend	0°	15° stechend	0°
Steghöhe in mm	0	3	0	-	-
Flankenwinkel	50°	45°	50°	90°	90°
t _{8/5} -Zeit	12 s	5 s	12 s	6 s	8 s
T _p , T _i in °C	30°C				

Ergänzend wurden Stumpfstöße mit V-Naht und LTT-Zusatzwerkstoff schweißnahtnahbehandelt. Dabei kamen die Verfahren „hochfrequentes Hämmern“ HFMI (Pit-Prozess) sowie das WIG-Aufschmelzen der Nahtübergänge zum Einsatz. Dies wurde an Proben aus beiden Werkstoffen S355J2+N sowie S960Q durchgeführt.

3.5 Metallographische Untersuchung Metallographic characterisation

Abbildung 8 bis Abbildung 12 zeigen die Ergebnisse der metallographischen Charakterisierung der verwendeten Stoßformen aus S355J2+N und S960Q im konventionell und LTT-geschweißten Zustand. Dargestellt sind makroskopische Aufnahmen der jeweiligen Schweißgefüge (Ätzung Nital) sowie die Ergebnisse von Härteprüfungen nach dem UCI (Ultrasonic Contact Impedance)-Verfahren in HV1.

Die Grundwerkstoffhärte beträgt etwa 160 HV1 (S355J2+N) bzw. 340 HV1 (S960Q). Der Zusatzwerkstoff G4Si1 führt zu einer Schweißnahtstärke von etwa 200 HV1 bis 25 HV1, wobei der Stumpfstoß (HV-Naht) und der Überlappstoß die höheren Härten aufweisen. Die zusätzliche Umschweißung der Stirnseite der Längssteife zeigt Härten bis 300 HV1. Ähnliche Beträge werden in der WEZ (Grobkorn) nachgewiesen. Der LTT-Zusatzwerkstoff führt zu Schweißnahtstärken bis etwa 450 HV1. Beim Kreuzstoß bewirkt das Schweißen der letzten Decklage ein Anlassen der gegenüberliegenden Seite und damit geringerer Härte i.H.v. etwa 420 HV1.

In konventionell geschweißten Proben aus hochfestem Werkstoff S960Q beträgt die Schweißnahtstärke etwa 300 HV1 bis 400 HV1. Die Wurzellagen des Kreuzstoßes weisen die geringste Härte aufgrund der nachfolgend eingebrachten Decklagen auf (Anlasswirkung). Die WEZ zeigt höhere Werte bis etwa 425 HV1. In LTT-geschweißten Proben werden beim S960Q ähnliche Härtewerte in der Schweißnaht ermittelt, wie beim S355J2+N.

Die hochfrequente Hämmerbehandlung (Pit / HFMI) bewirkt keine makroskopische Veränderung der Härte. Die WIG-Nachbehandlung an vier Schweißnahtkerben (Decklage und Nahtwurzel) führt zu einer nachweisbaren Aufhärtung der umgeschmolzenen Bereiche bis etwa 400 HV1. Dies ist mit einer teilweisen Aufmischung mit dem LTT-Schweißgut aber auch der relativ raschen Abkühlung des kleinen Schmelzevolumens zu begründen.

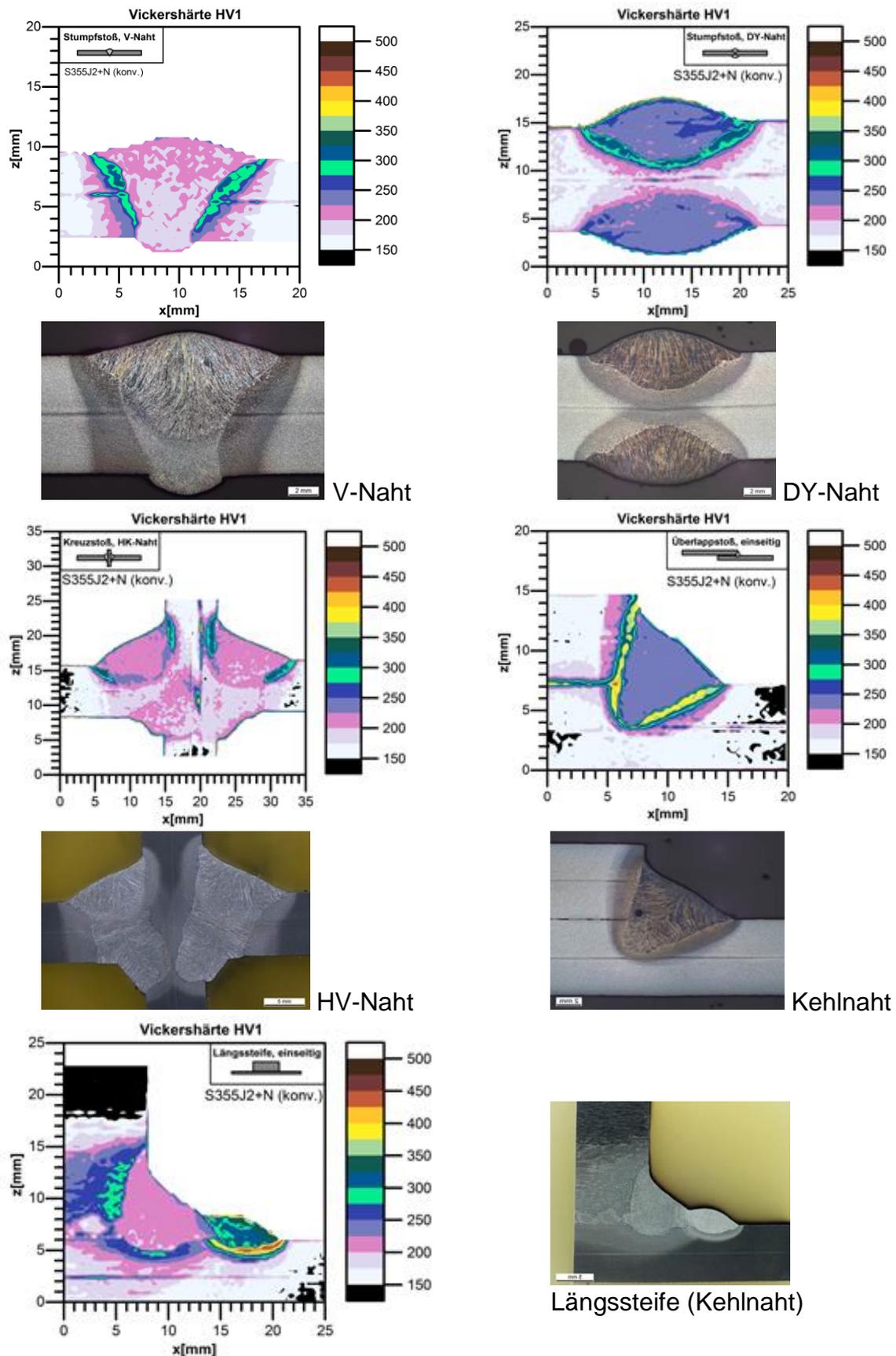


Abbildung 8 Härteverteilung (HV1) und Schlibfbilder der Stoßformen aus S355J2+N konventionell

Vorgehensweise und Versuchsplanung

Approach and design of experiments

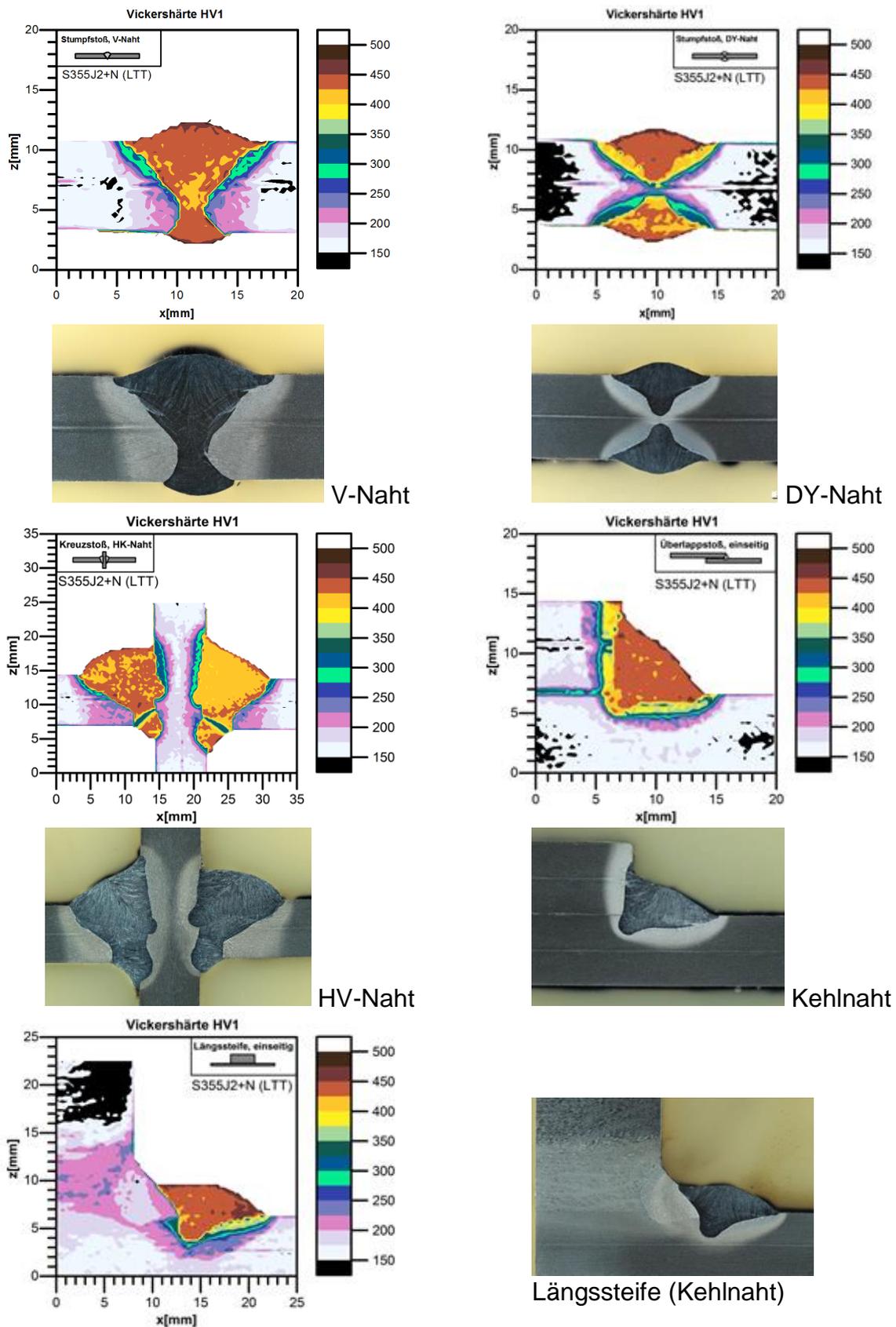


Abbildung 9 Härteverteilung (HV1) und Schliffbilder der Stoßformen aus S355J2+N LTT-geschweißt

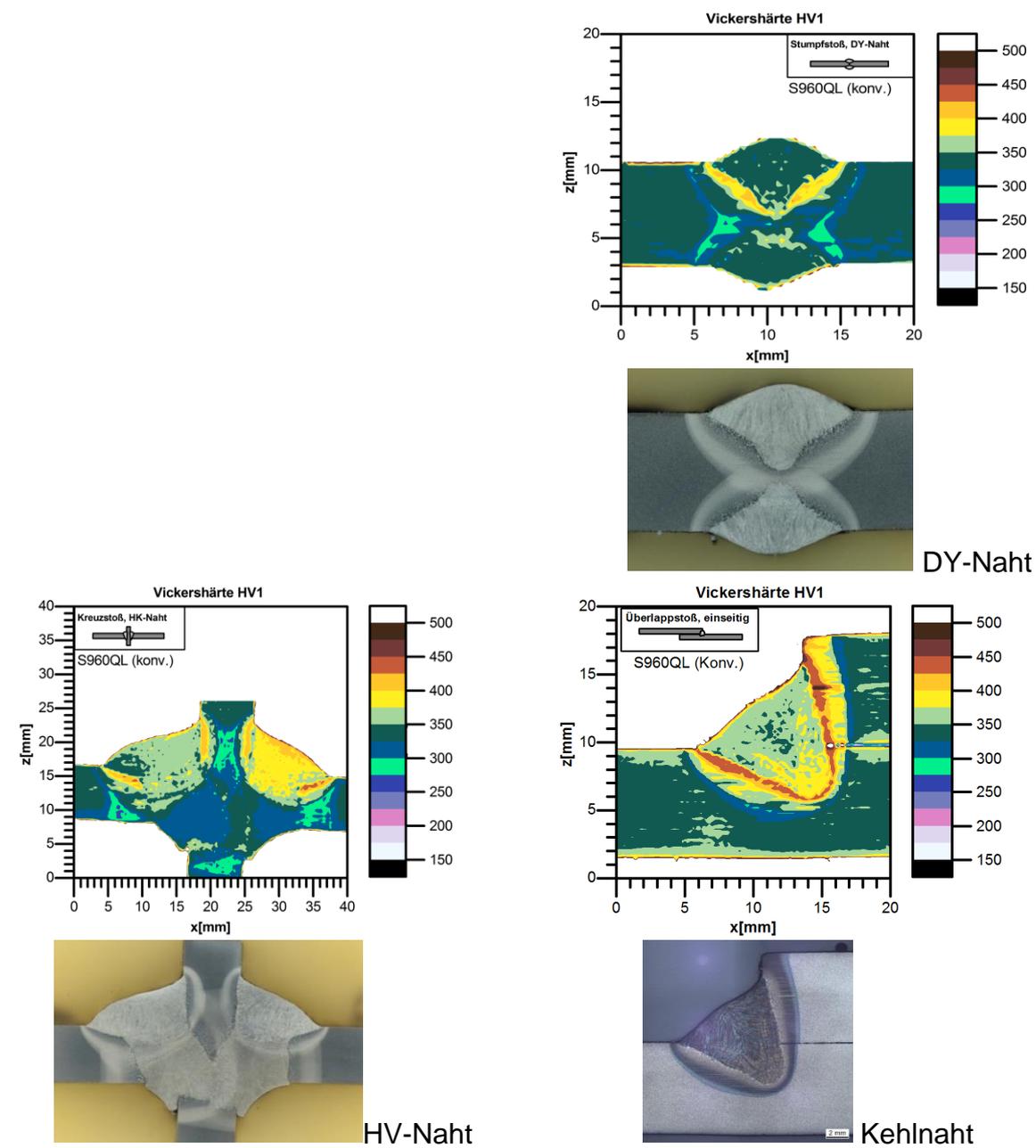


Abbildung 10 Härteverteilung (HV1) und Schlibbilder der Stoßformen aus S960Q konventionell

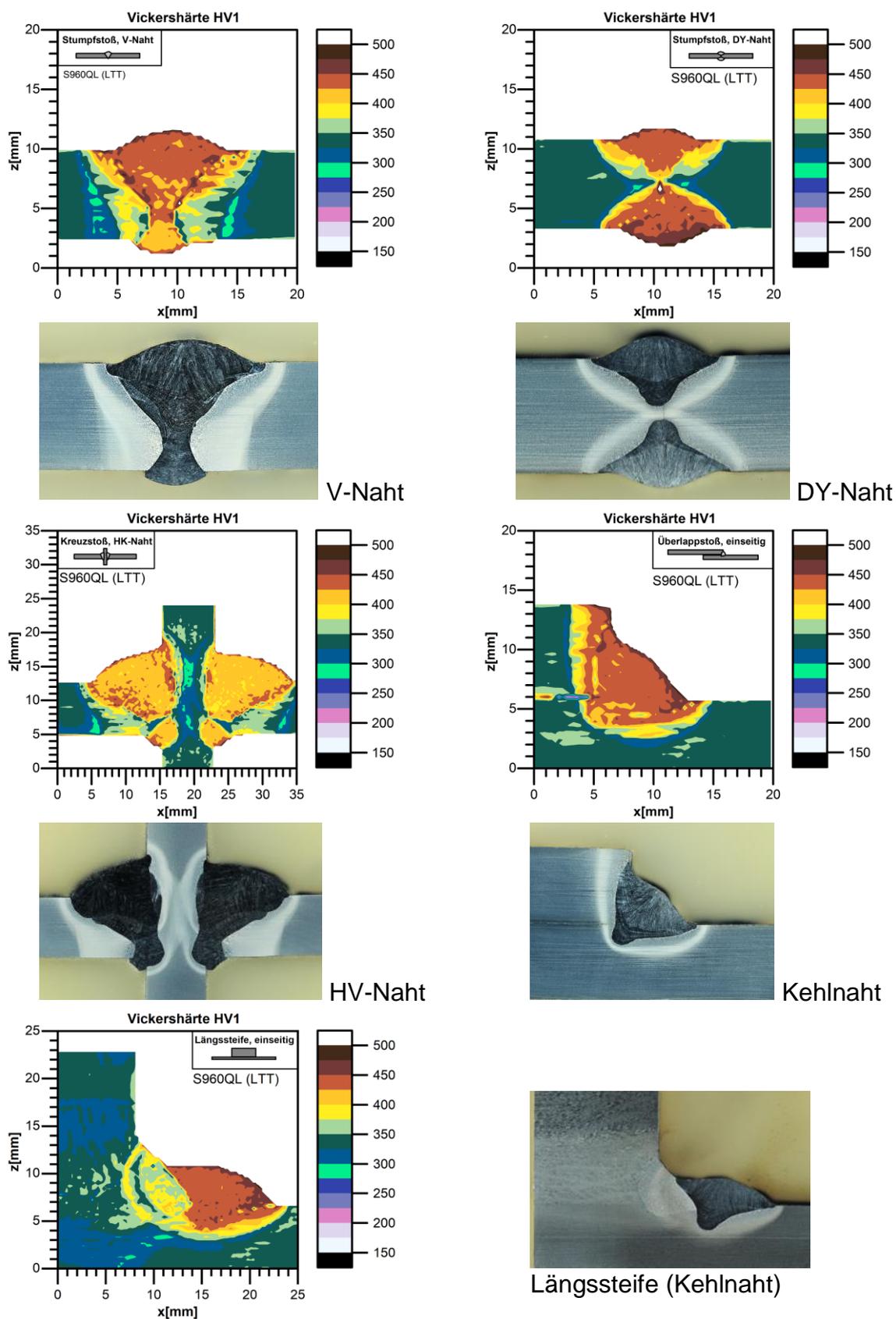
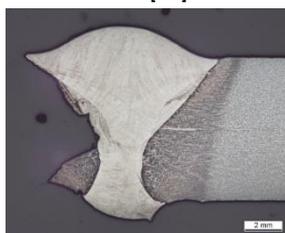
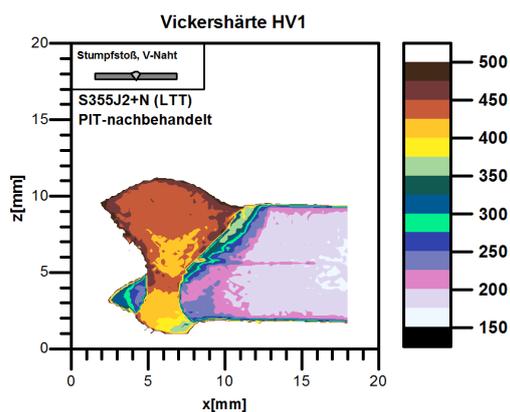
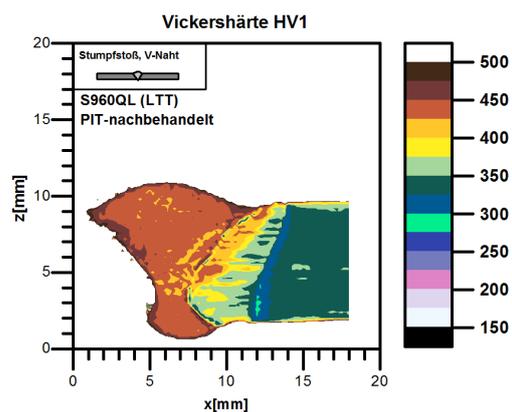


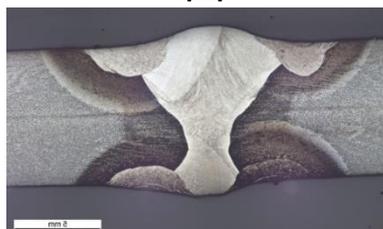
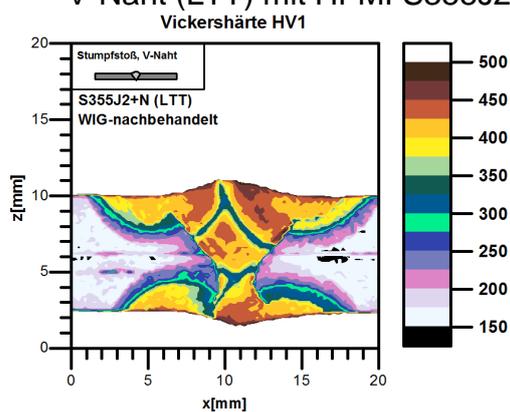
Abbildung 11 Härteverteilung (HV1) und Schlibbilder der Stoßformen aus S960Q LTT-geschweißt



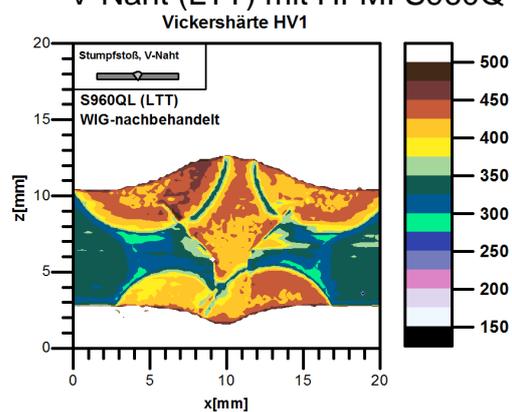
V-Naht (LTT) mit HFMI S355J2+N



V-Naht (LTT) mit HFMI S960Q



V-Naht (LTT) mit WIG S355J2+N



V-Naht (LTT) mit HFMI S960Q

Abbildung 12 Härteverteilung (HV1) und Schliffbilder der LTT-geschweißten Stoßformen aus S355J2+N und S960Q LTT mit HFMI und WIG-Schweißnahtnachbehandlung

3.6 Ermittlung der Proben- und Schweißnahtgeometrie Determination of specimen and weld geometry

An allen Schwingproben wurden mittels eines berührungslosen Lasertriangulationsensors Nahtprofile aufgenommen. Die Abtastung erfolgte mit einer Schrittweite von $20\ \mu\text{m}$ bei einem Laserpunktdurchmesser von $30\ \mu\text{m}$. Abbildung 13 zeigt das Messsystem mit der Abtasteinheit mit zwei rechtwinklig zueinander stehenden Lineareinheiten. Zur Erfassung der Nahtgeometrie der Schweißproben wurden quer zur Schweißnaht 3 Messspuren (Probenmitte und $\pm 15\ \text{mm}$) je Probe mit einer Gesamtlänge von $290\ \text{mm}$ aufgezeichnet. Die Ermittlung der Nahtgeometrieparameter erfolgte unter Verwendung einer eigenen Auswerteroutine, welche über eine Suchroutine die Nahtmitte und den Nahtübergang identifiziert und anschließend über einen Anpassungsalgorithmus die entsprechenden Nahtgeometriekennwerte wie Nahtflankenwinkel, Nahtüberhöhungen und Winkelverzug ermittelt.

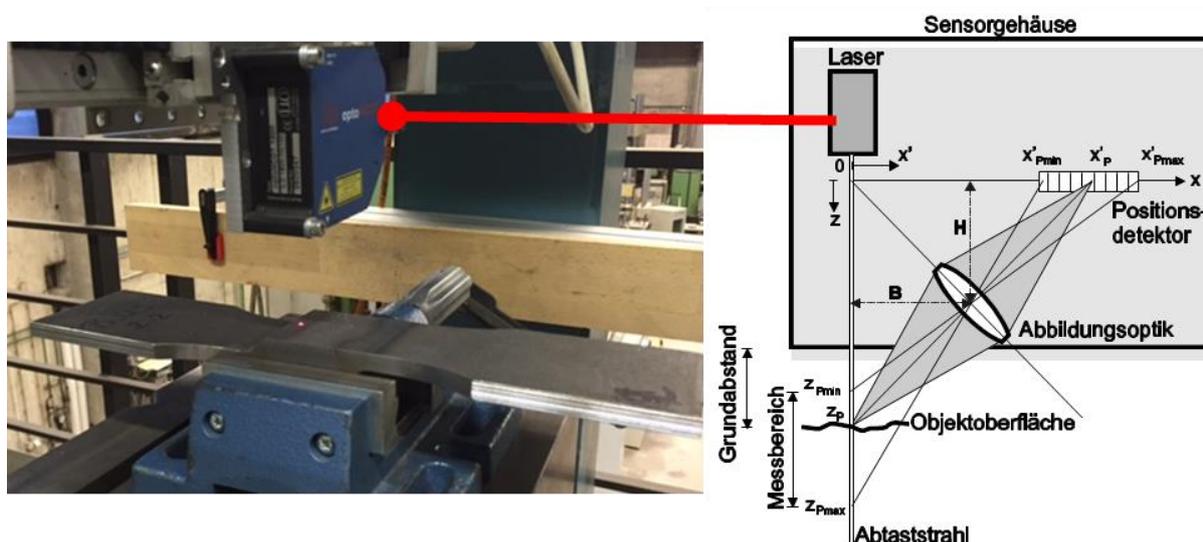


Abbildung 13 Messaufbau zur Erfassung der Nahtgeometrie. Profilmessung mittig in Probenlängsrichtung

Nach dem Schweißen und der Endbearbeitung wurde die Schweißnahtgeometrie gemessen und die Schweißnahtparameter bestimmt. Das Hauptmerkmal lag hier auf der Bestimmung des Winkelverzuges und des Kantenversatzes. Hier ist zu erwähnen, dass die Proben, die einen größeren Winkelverzug als $0,3\ \text{Grad}$ vorwiesen, in einem Dreipunkt-Biegeprozess an den Probenenden in den Einspannbereichen, also außerhalb der Schweißnaht, gerichtet wurden. Nachfolgend sind die Winkelverzüge aller Schweißdetails vor und nach dem Richten graphisch dargestellt, Abbildung 14 und Abbildung 15.

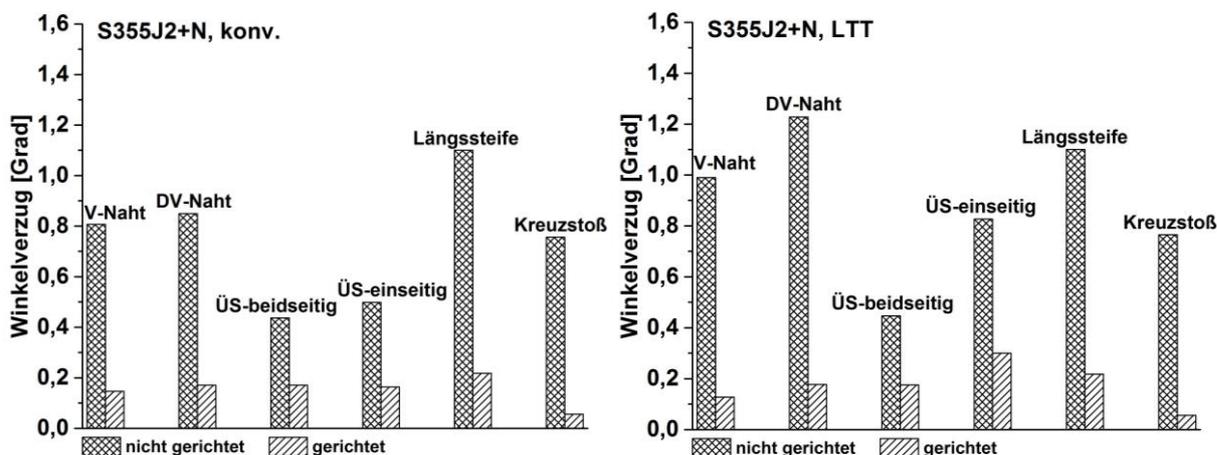


Abbildung 14 Aus dem Nahthöhenprofil ermittelter Winkelverzug vor und nach dem Richten, S355 J2+N konv. (links) und LTT-geschweißt (rechts).

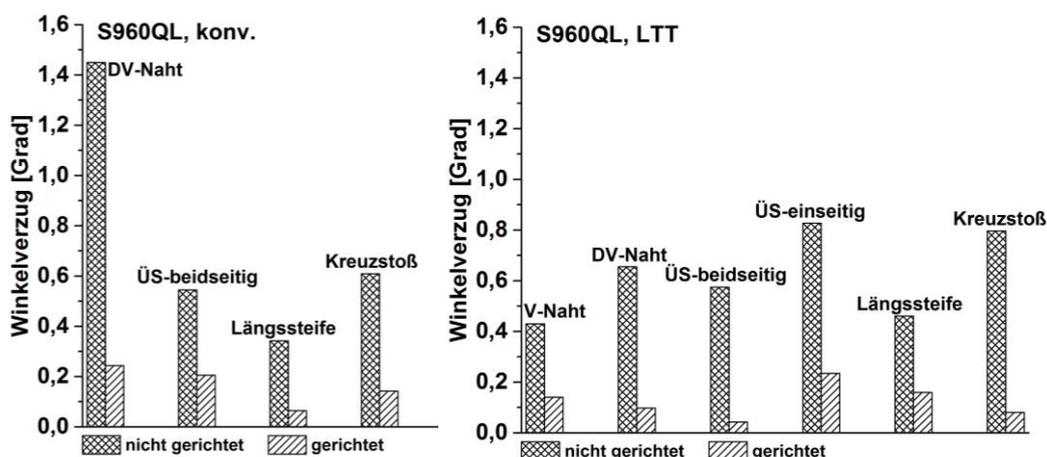


Abbildung 15 Aus dem Nahthöhenprofil ermittelter Winkelverzug vor und nach dem Richten, S960QL konv. (links) und LTT-geschweißt (rechts).

Die aus den Nahtprofilen ermittelten Flankenwinkel sind in Abbildung 16 zusammengestellt. Die Diagramme zeigen den Nahtöffnungswinkel an konventionell und LTT-geschweißten Verbindungen aus beiden Werkstoffen. Die Nahtflankenwinkel der einzelnen Gruppen sind größtenteils vergleichbar. Bei den Stumpfstoßen als V-Naht betragen die Mittelwerte zwischen 160 ° und 168 ° (Nahtübergang) bzw. zwischen 93 ° und 110 ° (Nahtübergang). Die Flankenwinkel der Stumpfstoße als DY-Naht betragen zwischen 157 ° und 166 °. Die Kehlnähte der Überlappstoße weisen steilere Winkel auf, sie betragen zwischen 139 ° und 145 °. Kreuzstoße zeigen teilweise kleinere Werte am Nahtübergang (zwischen 137 ° und 154 °) bzw. deutlich schärfere Anstiege an der Nahtwurzel (zwischen 123 ° und 126 °). An der zusätzlichen Umschweißung der Längssteife ergaben sich Beträge zwischen 142 ° und 155 °. Die Unterschiede mit der chargenweisen Fertigung der Proben an zwei Forschungsstellen (konventionell: ifs Braunschweig, LTT: BAM Berlin) erklärt werden.

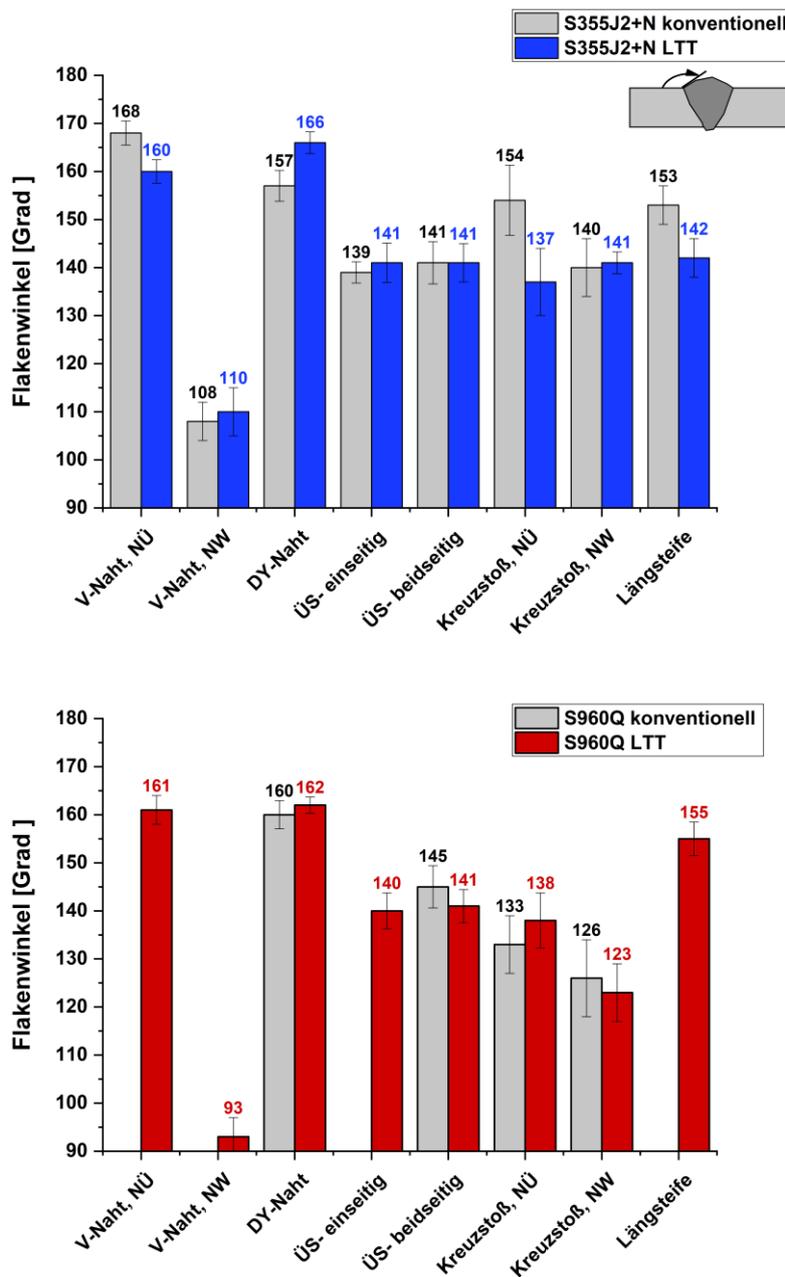


Abbildung 16 Aus dem Nahthöhenprofil ermittelter Nahtflankenwinkel der untersuchten Stoßformen aus S355J2+N (oben) und S960Q (unten). NÜ: Nahtübergang, NW: Nahtwurzel

4 Untersuchung der Schweißbarkeit der LTT-Zusatzwerkstoffe

Weldability of LTT-filler materials

Kurzfassung

Die sichere schweißtechnische Verarbeitung des bisher nicht kommerziell erhältlichen LTT-Zusatzwerkstoffes ist elementare Voraussetzung für die Durchführung der Schwingprüfung. Für die LTT-Zusätze wurde eine Strom-Spannungs-Kennlinie erarbeitet. Zur Einstellung eines stabilen Schweißprozesses dienten manuelle Kehlnahtschweißungen unter Variation des Schutzgases. Die Schweißnahtqualität wurde anhand der Nahtausbildung, Anbindung an den Grundwerkstoff sowie der Spritzerbildung von Auftragschweißungen überprüft. Ferner dienten Röntgendurchstrahlungsprüfungen als Nachweis für Poren- und rissfreie Nähte. Die chemische Zusammensetzung und die Härte der Schweißnähte offenbarten jeweils homogene Verteilungen. Letztlich wurde ein Cr-Ni-basierter LTT-Zusatz für die Schwingfestigkeitsanalyse ausgewählt.

Abstract

The safe welding processing of the LTT filler material, which has not yet been commercially available, is an elementary prerequisite for fatigue testing. A current-voltage characteristic was developed for the LTT fillers. Manual fillet welds with variation of the shielding gas were used to set up a stable welding process. The weld seam quality was tested based on the weld appearance, the bonding to the base material and the spatter formation. Furthermore, X-ray examinations were used as proof for pore- and crack-free welds. The chemical composition and hardness of the welds revealed homogeneous distributions. Finally, a Cr-Ni-based LTT filler was selected for the fatigue analysis.

4.1 Methode

Da es sich bei dem LTT-Zusatz um eine nicht kommerzielle Werkstoffcharge handelte, musste zunächst eine Strom-Spannungs-Kennlinie erarbeitet werden. Dazu wurden für den LTT-Zusatzwerkstoff anhand manuell durchgeführter Kehlnahtschweißungen Spannungskorrekturen in Abhängigkeit des Schutzgases und des Arbeitspunktes der Kennlinie eingestellt. Die Prozessstabilität, die Nahtausbildung sowie die Anbindung der Schmelze an den Grundwerkstoff wurden anhand halbautomatisiert durchgeführter Auftragschweißungen begutachtet.

Ferner wurden die in Abbildung 6 gezeigten Probenformen anhand der Schweißparameter hinsichtlich der Nahtgüte optimiert. Die röntgenografische Durchstrahlungsprüfung wurde zur Bewertung möglicher Nahtunregelmäßigkeiten herangezogen. Die Mikro- und Makrostruktur der Schweißnähte wurde mittels metallographischer Untersuchungen sowie der Bestimmung der (Mikro-) Härteverteilungen über dem Querschnitt begutachtet.

Die Ermittlung der Eigenspannungen an der Oberseite der geschweißten Proben erfolgte mittels Röntgenbeugung, vor und nach dem Wasserstrahlschneiden, exemplarisch an ausgewählten Proben. Wichtige Mess- und Auswerteparameter finden sich in

Tabelle 4. Längs- (Schweißrichtung) und Quereigenspannungen wurden bestimmt. Die Auswertung erfolgte nach der $\sin^2\psi$ -Methode.

Tabelle 4 Parameter der röntgenografischen Spannungsanalyse

Strahlung	Cr K α
Beugungslinie	Fe α {211}
2 Θ	156°
Kollimator	ø 2 mm
Zählzeit	10 s
DEK	$s_1 = -1,27 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ und $\frac{1}{2}s_2 = 5,8 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$

4.2 Schweißtechnische Verarbeitung und Nahteigenschaften

Ab einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von $8 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$ konnte ein Sprühlichtbogen erzeugt werden. Mit Hilfe der oxidierend wirkenden Schutzgase M20 und M21 konnte sowohl im MAG- als auch im MAG-Puls-Prozess eine stabile Prozessführung gewährleistet werden. Durch die Optimierung der Pulsparameter und Einstellung des Strompulses in Stufenform wurde die Tropfenablösung bzw. Prozessstabilität für die untersuchten Schutzgase optimiert. Der MAG-Puls-Prozess war mit einer reduzierten Schweißspritzerbildung verbunden. Die röntgenographische Durchstrahlungsprüfung zeigte, dass für den LTT-Zusatz auch mit zunehmender Drahtvorschubgeschwindigkeit keine Poren vorlagen (Bewertungsgruppe B – DIN EN ISO 5817). Die mittels Funkenemissionsspektroskopie (FES) ermittelte chemische Zusammensetzung des Schweißgutes ließ keine signifikanten Abhängigkeiten vom gewählten Schutzgas erkennen. Abbildung 17 zeigt die mittels FES gemessenen Gehalte der Hauptlegierungsbestandteile Chrom und Nickel für die Schutzgase M20, M21 sowie versuchsweise auch für die Schutzgase M13 und M12.

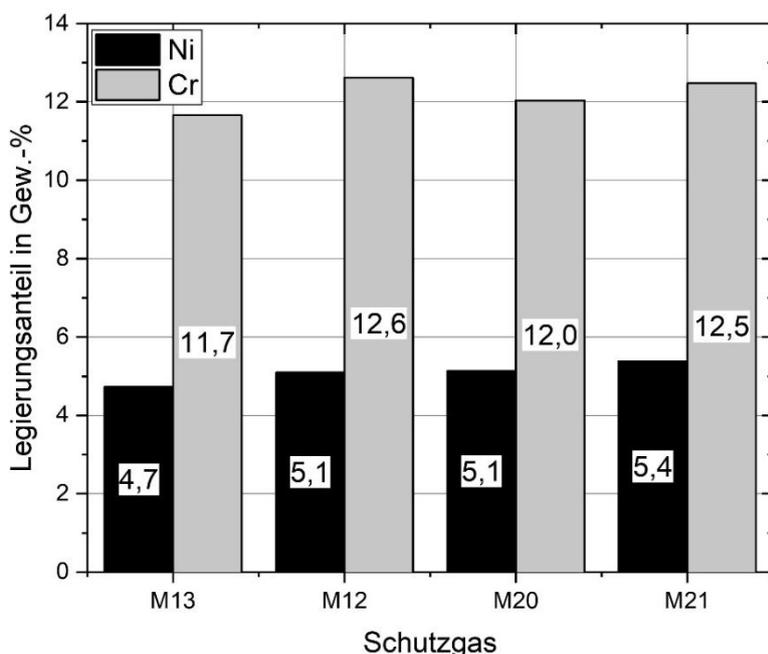


Abbildung 17 Anteil an Cr und Ni im LTT-Schweißgut in Abhängigkeit des Schutzgases

Auch die Zähigkeit des LTT-Schweißgutes zeigt eine nur geringe Abhängigkeit vom verwendeten Schutzgas (Abbildung 18). Die Werte liegen fast unabhängig von der Prüftemperatur knapp über 20 J. Eine Ausnahme bildet der Einsatz des Schutzgases M12. Hier finden sich signifikant höhere Kerbschlagwerte bis zu 35 J, was auf den in diesem Falle geringeren Sauerstoffanteil im Schweißgut zurückzuführen ist. Dennoch lassen sich nicht die Werte des mit konventionellem Zusatzwerkstoff G Mn4Ni2 CrMo erzeugten Schweißgutes von bis zu 40 J bei -40 °C erreichen.

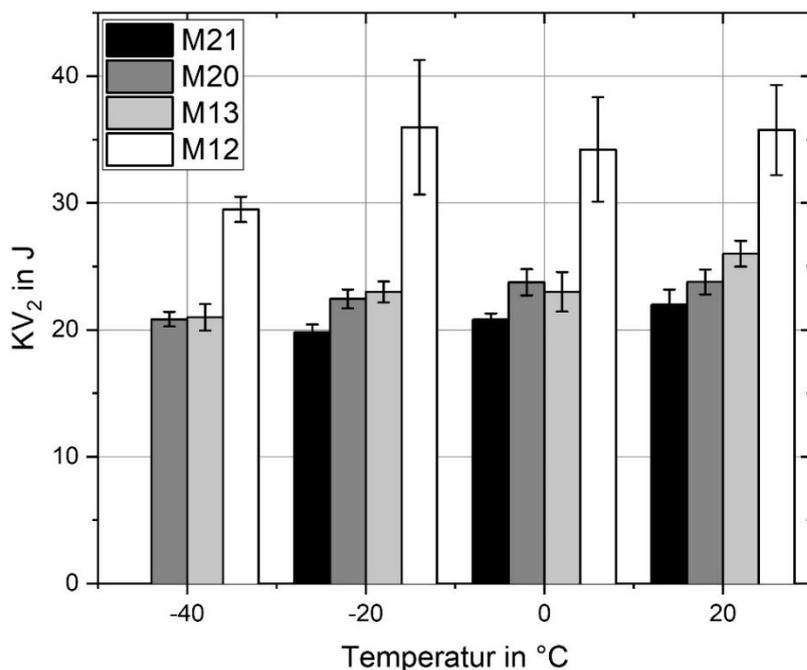


Abbildung 18 Kerbschlagarbeit des LTT-Schweißgutes in Abhängigkeit des Schutzgases

Das LTT-Schweißgut ist martensitisch ohne nachweisbarem Anteil an Restaustenit. Das Gefüge ist innerhalb der zweilagig ausgeführten V-, DY- und HV-Nähte homogen. Auch die einlagig ausgeführte Kehlnaht am Überlappstoß zeigt ein weitgehend homogenes Gefüge. Abbildung 19 ist zu entnehmen, dass die Härte aller Schweißgüter nur wenig variiert. Aufgrund der hohen Festigkeit beträgt sie im Mittel etwa 440 HV 0,1 (vgl. Tabelle 2). Im Falle der zweiseitig ausgeführten DY-Naht und der HV-Naht ist ein schmaler Anlassbereich im Wurzelbereich der jeweils ersten Lage auszumachen.

Untersuchung der Schweißbarkeit der LTT-Zusatzwerkstoffe Weldability of LTT-filler materials

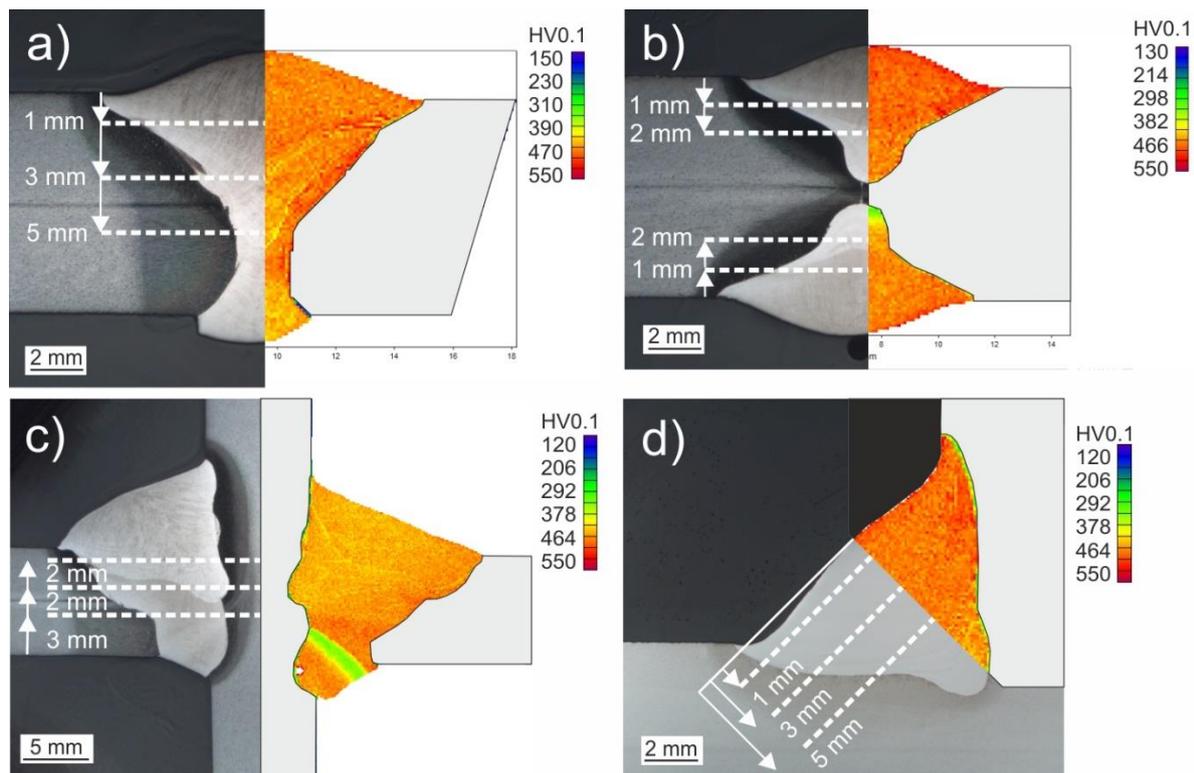


Abbildung 19 Querschliffe mit Härteprofilen der LTT-Schweißgüter und Pfade der WDX-Elementanalyse, a) Stumpfstoß mit V-Naht, b) Stumpfstoß mit DY-Naht, c) Kreuzstoß mit HV-Naht, d) Überlappstoß mit Kehlnaht

Mit Hilfe der wellenlängendispersiven Röntgenspektroskopie (WDX) wurde die Verteilung der Hauptlegierungselemente Cr, Ni, Mn, Mo und C entlang der in Abbildung 19 eingezeichneten Pfade ermittelt. Mit Hilfe dieser Werte kann nach Steven und Haynes [26] die theoretisch zu erwartende M_s -Temperatur abgeschätzt werden. Diese Berechnungsvorschrift hat sich gerade für LTT-Zusätze auf Fe-Cr-Ni-Basis als Bewertungsinstrument bewährt [8]. Abbildung 20 gibt die auf Basis der Elementverteilung berechnete M_s -Temperatur für die Schweißgüter wieder. Daraus geht hervor, dass unter Berücksichtigung der Streuung, aufgrund lokaler Entmischung, in beiden Verbindungen im Mittel mit niedrigen Umwandlungstemperaturen zu rechnen ist. Demnach zeigen auch die Wurzelbereiche M_s -Temperaturen um 250°C auf. Lediglich im Bereich der Decklage ist aufgrund leichten Abbrandes mit einem Elementverlust und damit einer gegenüber dem Sollwert leicht angehobenen M_s zu rechnen. Erst der jeweilige Übergang in die angrenzende WEZ ist dann durch eine sprunghafte Änderung der M_s aufgrund der Elementverteilung gekennzeichnet. Das bedeutet, dass praktisch im gesamten Schweißgut von entsprechend niedrigen M_s -Temperaturen auszugehen ist. Damit kann der gewünschte Effekt der Phasenumwandlung zum Tragen kommen. In der WEZ gibt die Berechnung nach Steven und Haynes [26] mit ca. 420°C die im Grundwerkstoff zu erwartende M_s -Temperatur ebenfalls gut wieder.

Untersuchung der Schweißbarkeit der LTT-Zusatzwerkstoffe Weldability of LTT-filler materials

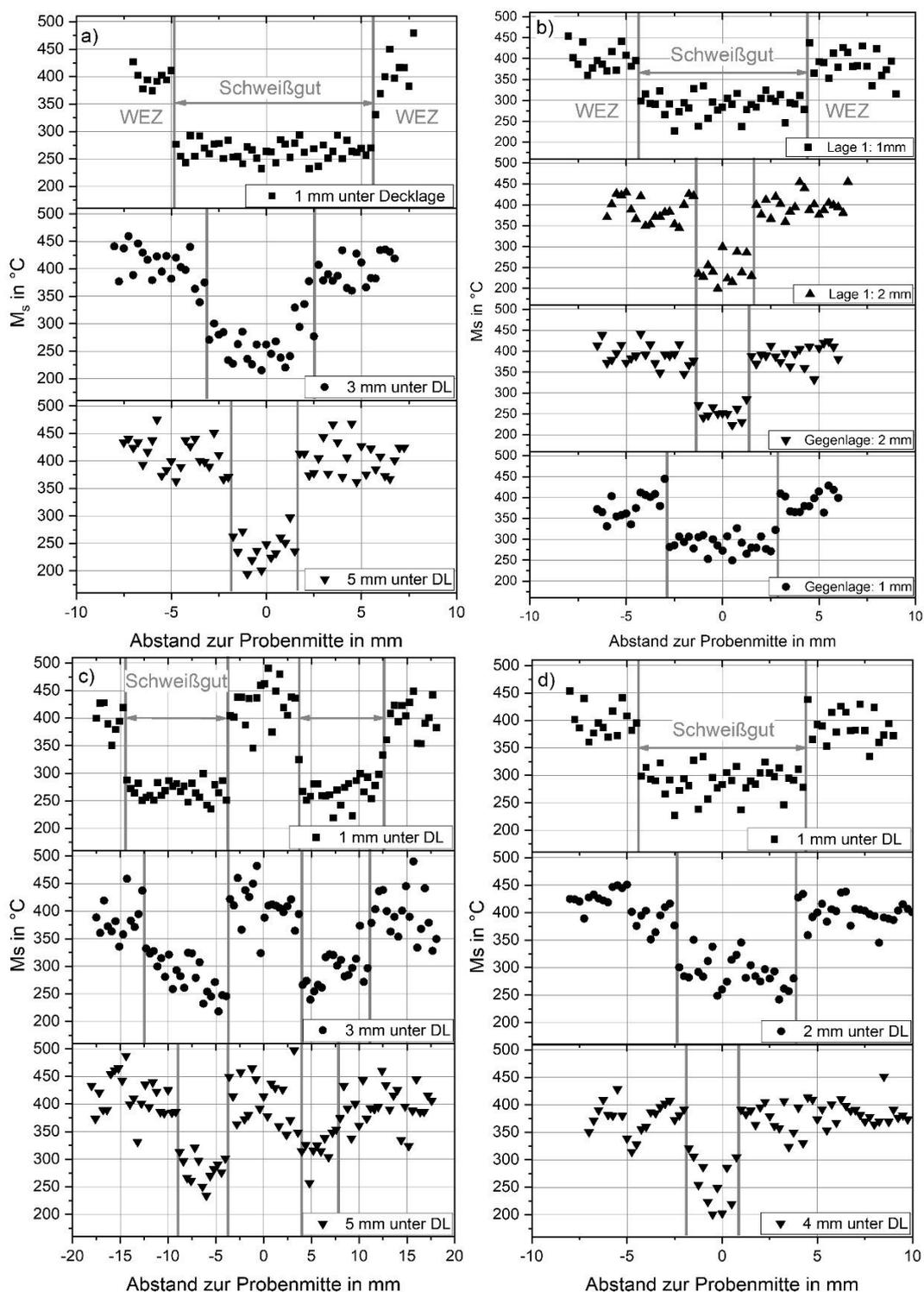


Abbildung 20 Auf der Elementverteilung entlang der in Bild 6 skizzierten Pfade basierende Berechnung der M_s -Temperatur nach [26], a) Stumpfstoß mit V-Naht, b) Stumpfstoß mit DY-Naht, c) Kreuzstoß mit HV-Naht, d) Überlappstoß mit Kehlnaht

4.3 Eigenspannungen in Abhängigkeit der Prozessparameter

Die Eigenspannungen wurden an mehreren Proben exemplarisch nach dem Schweißen und dann nach der Entnahme aus den gefügten Blechen (vgl. Abbildung 7) ermittelt. Die ermittelten Werte sind in guter Übereinstimmung mit den am ifs durchgeführten Untersuchungen (vgl. Abschnitt 7). Abbildung 21 zeigt die Eigenspannungen des Stumpfstoßes mit V-Naht für den Werkstoff S355. In Längsrichtung finden sich zu beiden Seiten des Schweißgutes Zugeigenspannungsmaxima bis etwa 200 MPa. Am Übergang zum Schweißgut fallen die Eigenspannungen ab, bleiben jedoch im Zugbereich. Außerhalb der WEZ sind ausschließlich Druckeigenspannungen anzutreffen aufgrund des Reinigungsstrahlens der Bleche vor dem Schweißen. Die Entnahme der Schwingproben führt zur leichten Umlagerung der Eigenspannungen, welche sich in einer Parallelverschiebung von maximal -100 MPa äußert. Dies ist vor allem im Grundwerkstoff ausgeprägt. Die Eigenspannungen der WEZ ändern sich nur geringfügig. Der Effekt der Spannungsumlagerung ist in Querrichtung kaum vorzufinden. Das gesamte Eigenspannungsniveau liegt im Druckbereich wobei die WEZ die niedrigsten Werte von bis zu -200 MPa aufweist. Die Eigenspannungen im Schweißgut ließen sich aufgrund von Textur-/Grobkorneffekten und einem damit verbundenen hohen Messfehler nur punktuell ermitteln. Tendenziell zeigen die Eigenspannungen in Schweißgutlängsrichtung vom Betrag geringe positive bzw. negative Werte. Hingegen ist die Querrichtung eher von hohen Zugeigenspannungen gekennzeichnet. Dies ist bereits in vorangegangenen Arbeiten [24] beobachtet worden.

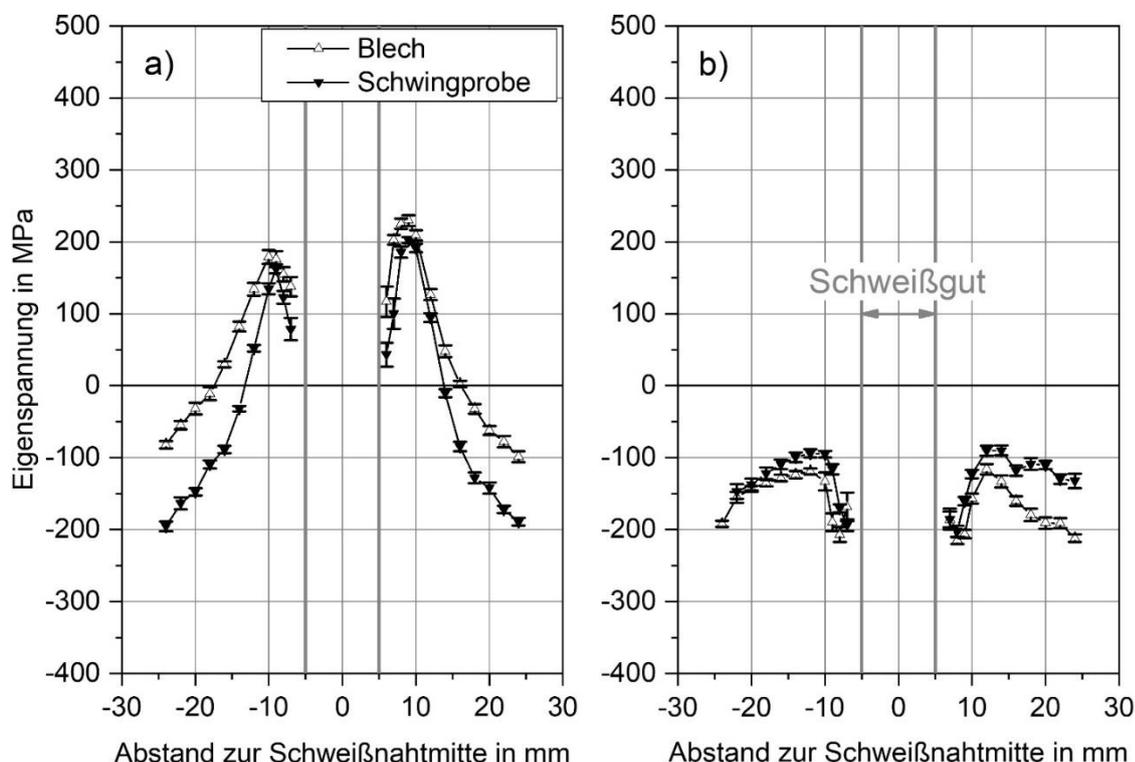


Abbildung 21 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfstoße mit V-Naht, Werkstoff S355+LTT-Zusatz; Vergleich nach dem Schweißen (Blech) und nach dem Heraustrennen der Schwingprobe

Qualitativ ähnlich verlaufen die Eigenspannungen in den Stupfstößen mit V-Naht im Grundwerkstoff S960 (Abbildung 22). Die bereits im S355 beobachteten Maxima in Längsrichtung nehmen jedoch höhere Werte von bis zu 350 MPa an. Die Spannungsumlagerung aufgrund des Trennvorgangs zeigt sich auch hier vornehmlich im Grundwerkstoff. In Querrichtung zeigen die Eigenspannungen in der WEZ im Vergleich zum S355 etwas höhere Werte. Diese liegen mit ca. -100 MPa jedoch auch im Druckbereich. Das gleiche gilt prinzipiell auch für die in Abbildung 23 und Abbildung 24 gezeigten Eigenspannungen am Stupfstoß mit DY-Naht. Aufgrund der Symmetrie dieser Nahtform über dem Blechquerschnitt führt die Entnahme der Schwingproben aus den geschweißten Blechen zu keiner merklichen Umlagerung der Eigenspannungen.

Hinsichtlich der Wirkung des LTT-Zusatzes auf die Eigenspannungen in der WEZ lassen sich zwischen den Grundwerkstoffe S355 und S960 keine signifikanten Unterschiede feststellen. Insgesamt ist das Eigenspannungsniveau, gemessen an den jeweiligen Fließgrenzen, gering, was auf die relativ kleinen Blech- bzw. Schwingprobenabmessungen und damit geringen Einspanngrad zurückzuführen ist.

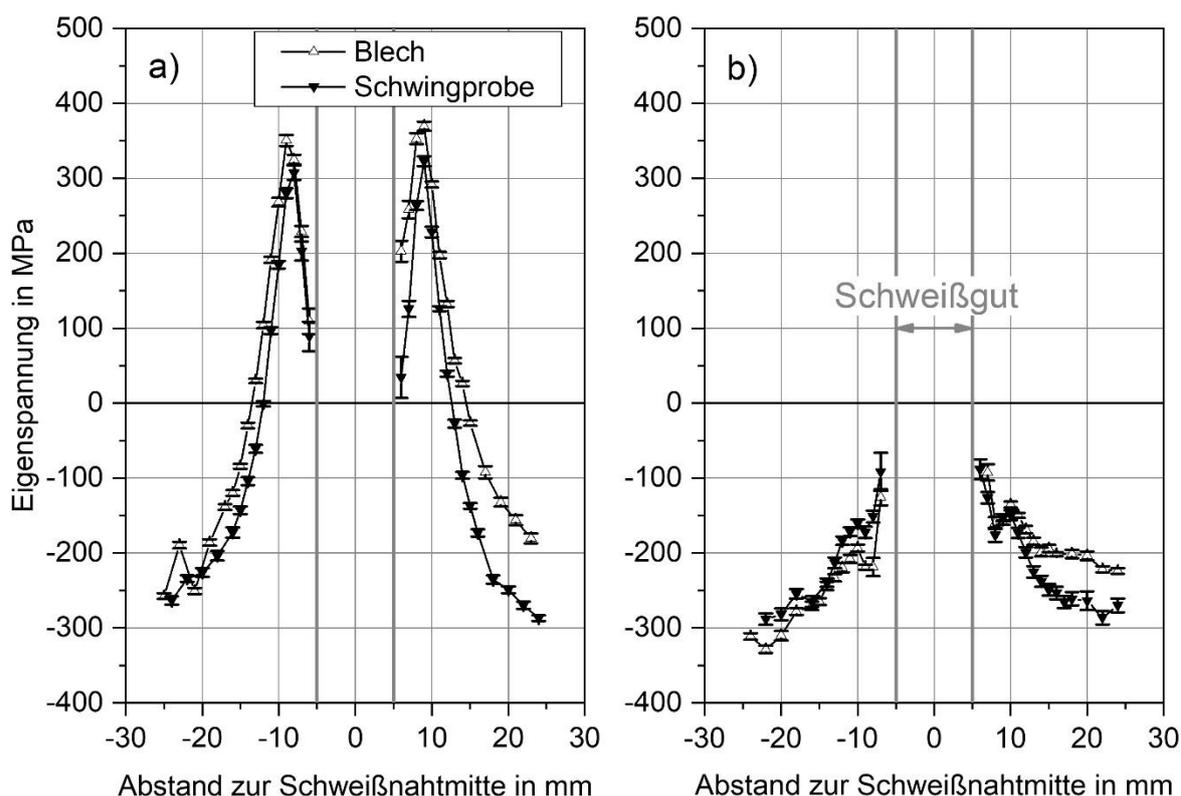


Abbildung 22 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stupfstöße mit V-Naht, Werkstoff S960+LTT-Zusatz; Vergleich nach dem Schweißen (Blech) und nach dem Heraustrennen der Schwingprobe

Untersuchung der Schweißbarkeit der LTT-Zusatzwerkstoffe
Weldability of LTT-filler materials

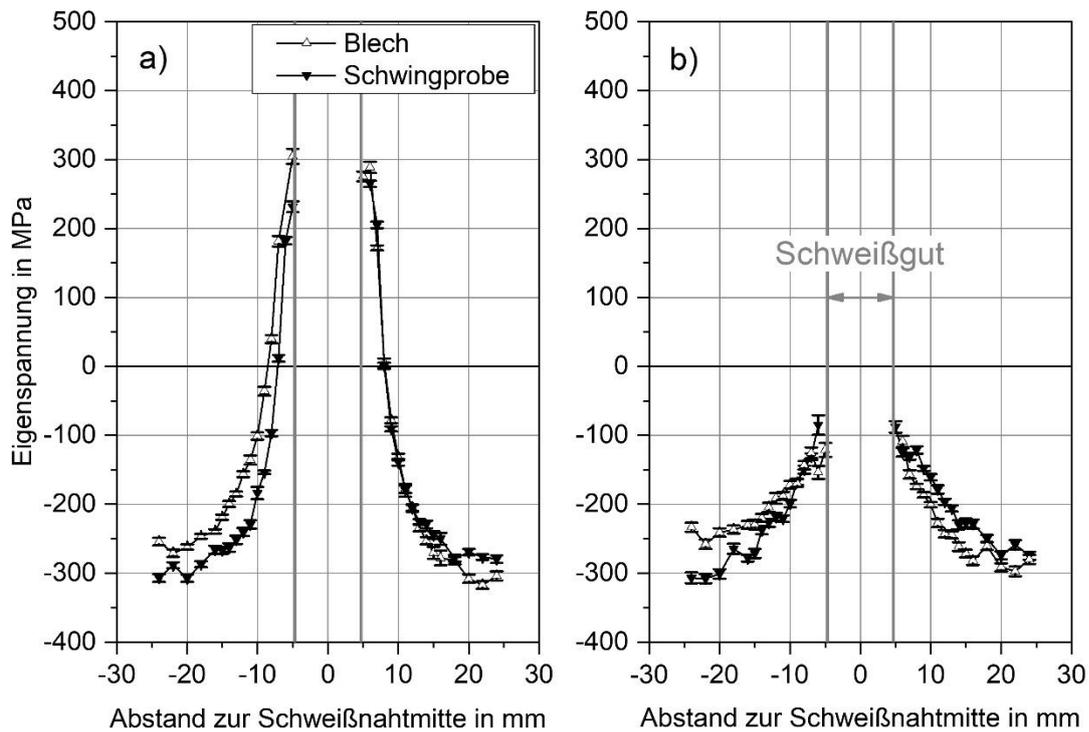


Abbildung 23 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfstoße mit DY-Naht, Gegenlage, Werkstoff S960+LTT-Zusatz; Vergleich nach dem Schweißen (Blech) und nach dem Heraustrennen der Schwingprobe

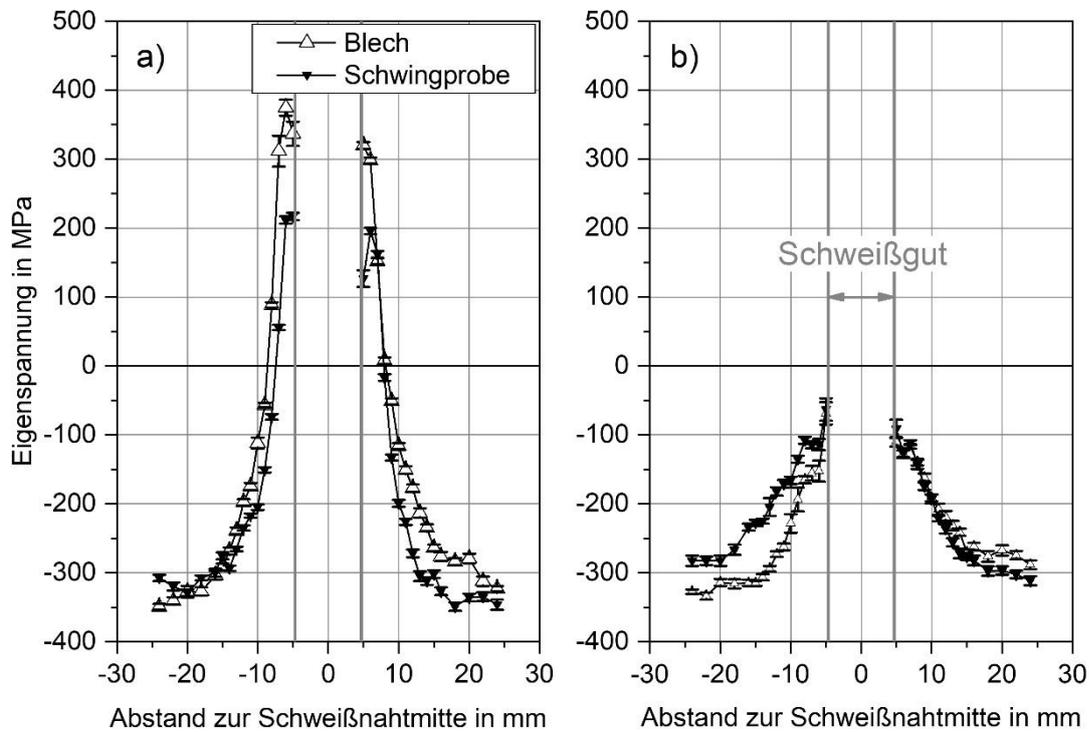


Abbildung 24 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfstoße mit DY-Naht, Lage 1, Werkstoff S960+LTT-Zusatz; Vergleich nach dem Schweißen (Blech) und nach dem Heraustrennen der Schwingprobe

5 Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der Schweißbedingungen und des Einspanngrades

Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and restraint

Kurzfassung

Versuche in einer speziellen Prüfeinrichtung ermöglichten es, die Spannungsentstehung beim Schweißen unter definierter Einspannung zu bewerten. Es wurden Stumpfstoße mit der Blechdicke von 25 mm geschweißt. Erweiternd zu den freischumpfenden Versuchen wurden mehrlagige Versuche unter Kombination des LTT-Zusatzes mit einem konventionellen Zusatz durchgeführt, um einen möglichst wirtschaftlichen Einsatz der LTT-Zusätze zu bewerten. Die Ermittlung der lokalen Eigenspannungen erfolgte nach dem Schweißen röntgenografisch an der Oberfläche als auch mittels Neutronenbeugung im Innern des Schweißgutes. Zusätzlich wurden die Nahteigenschaften anhand der Mikrohärtigkeit und der chemischen Zusammensetzung begutachtet. Die Verwendung des LTT-Zusatzes im Bereich der Decklage ergab, gegenüber der konventionellen Ausführung eine leichte Verringerung des Reaktionsspannungsniveaus, was auf die Wirkung der martensitischen Phasenumwandlung zurückgeführt werden konnte. Vor allem die Eigenspannungen im Innern der LTT-gefügten Verbindung lassen eine signifikante Reduktion bis in den Druckbereich gegenüber der konventionellen Verbindung erkennen.

Abstract

Tests in a special test facility made it possible to evaluate the stress formation during welding under restraint. Butt joints with a thickness of 25 mm were used. In addition to the free-shrinking tests, multilayer welds were carried out using the LTT filler in combination with a conventional one to evaluate a more economical use of the LTT fillers. After welding, the local residual stresses were determined using X-rays on the surface and using neutron diffraction inside the weld metal. In addition, the joint properties were assessed based on the microhardness and the chemical composition. The use of the LTT filler in the surface layer resulted in a slight reduction of the reaction stress level compared to the conventional design, which could be attributed to the effect of the martensitic phase transformation. Especially the residual stresses inside the LTT-joint showed a significant reduction up to compressive values compared to the conventional joint.

5.1 Methode

Bauteilschweißversuch zur Analyse der Spannungsentstehung unter Einspannung

Zur Bewertung der unter konstruktiver Einspannung auftretenden Beanspruchungen beim Schweißen mit LTT-Zusatzwerkstoff kam ein spezielles 2-MN-Prüfsystem zum

Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der Schweißbedingungen und des Einspanngrades

Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and restraint

Einsatz (Abbildung 25). Die hydraulisch gesteuerte Anlage dient der realitätsnahen Simulation der Struktursteifigkeit komplexer Bauteilschweißungen. Sechs unabhängig arbeitende Hydraulikzylinder ermöglichen die Erfassung der während des Schweißens auftretenden Reaktionskräfte und -momente, wenn die Probe in ihrer Ausdehnung und Schrumpfung behindert wird. Die Reaktionskraft ergibt sich als Summe der Einzelreaktionskräfte in den sechs Kolbenstangen. Diese werden mittels DMS erfasst. Das Biegemoment um die Schweißnahtlängsachse wird als Summe der Einzelreaktionskräfte in den sechs Kolbenstangen. Diese werden mittels DMS erfasst. Das Biegemoment um die Schweißnahtlängsachse wird als Summe der Einzelreaktionskräfte multipliziert mit den vorliegenden Hebelarmen zur Probenmitte bestimmt. Bezogen auf den tragenden Querschnitt der Proben kann dann die Reaktionsspannung als Summe aus den Kräften (Normalspannung) und Momenten (Biegespannung) berechnet werden. Die Positionierung der Proben erfolgt kraftschlüssig über hydraulische Spannvorrichtungen. Der Einspanngrad ergibt sich als Folge der Steifigkeit der geschweißten Probe und der Systemsteifigkeit der Anlage. Tabelle 5 fasst einige Leistungsmerkmale der Prüfanlage zusammen.

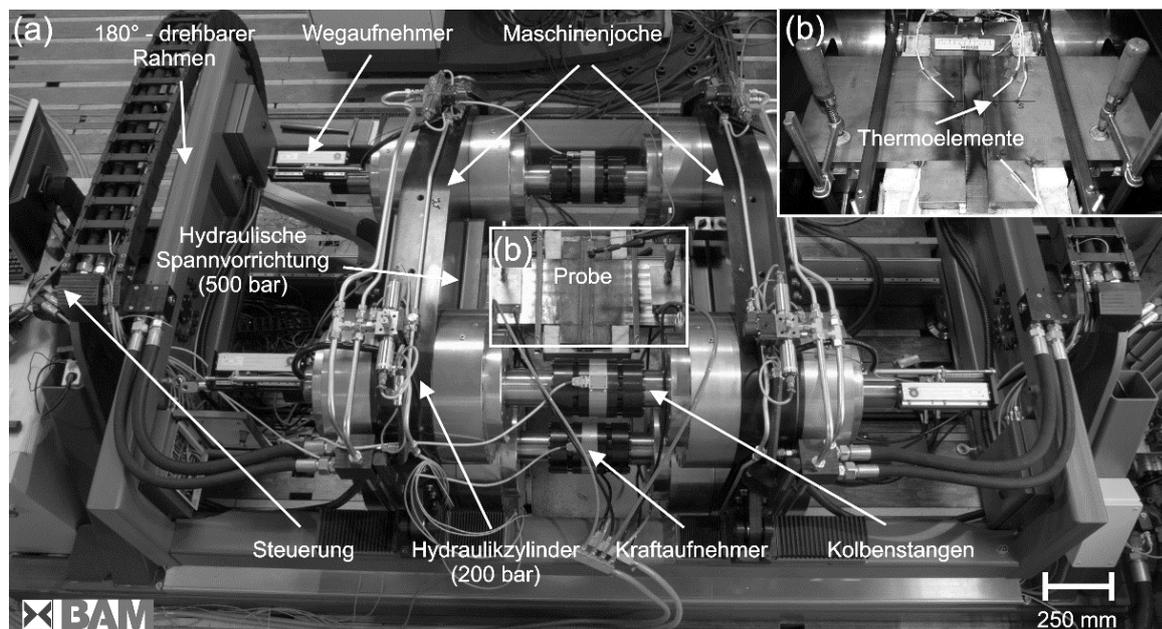


Abbildung 25 Übersichtsaufnahme der „2-MN-Prüfanlage“ a), mit eingespannter Probe b)

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Bleche des Werkstoffs S960QL der Abmessung 980 mm x 250 mm x 25 mm (Länge x Breite x Dicke) genutzt. Die Bleche mit V-Naht-Konfiguration (Flankenwinkel 22,5°) wurden mehrlagig mit acht Raupen geschweißt. Neben einer vollständig mit konventionellem Schweißzusatz gefügten Verbindung wurde der Einsatz des LTT-Zusatzes in den letzten drei Raupen der Decklage realisiert. Die wichtigsten Prozessparameter sind in Tabelle 6 aufgeführt. Das Vorwärmen erfolgte über Heizmatten. Zur Temperaturüberwachung kamen Thermoelemente zum Einsatz. An- und Auslaufstücke ermöglichten einen stabilen Schweißprozess im kraftübertragenden Bereich der Naht. Der MAG-Schweißprozess wurde halbautomatisiert durchgeführt.

Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der
Schweißbedingungen und des Einspanngrades
Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and
restraint

Tabelle 5 Leistungsmerkmale des 2-MN-Prüfsystems

Prüfkraft maximal:	± 2 MN (200 t), Zug- oder Druckkraft
Messgenauigkeit Weg:	0,1 µm
Regelgenauigkeit Weg:	1 µm
Messgenauigkeit Kraft:	0,25 kN
Regelgenauigkeit Kraft:	0,50 kN
Systemsteifigkeit (Zug):	1377 kN × mm ⁻¹
Systemsteifigkeit (Druck):	1222 kN × mm ⁻¹
Einspanngrad (Zug, 25-mm-Blech):	3,17 kN × mm ⁻¹ × mm ⁻¹
Einspanngrad (Druck, 25-mm-Blech):	2,96 kN × mm ⁻¹ × mm ⁻¹
Anlagegröße (horizontal):	4 m (l) × 2 m (b) × 1,5 m (h)
Hebelarm (a) für Moment MX:	230 mm
Probendimension maximal:	1000 mm (l) × 300 mm (b) × 50 mm (h)

Tabelle 6 Schweißparameter und Temperaturführung

	Konventionell (G Mn4Ni2 CrMo)	G Mn4Ni2 CrMo / LTT in der Decklage
Schweißspannung in V	265 A – 270 A	271 A / 265 A
Stromstärke in A	27 V – 29 V	27 V / 29 V
Schweißgeschwindigkeit in mm × min ⁻¹	270 mm × min ⁻¹	270 mm × min ⁻¹ / 260 mm × min ⁻¹
Drahtvorschub	9 m × min ⁻¹	
Raupenanzahl	8	5 konventionell + 3 LTT
T _p , T _i in °C	50 °C	

Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der Schweißbedingungen und des Einspanngrades
 Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and restraint

Eigenspannungsanalyse mittels Röntgen- und Neutronenbeugung

Die Eigenspannungen der geschweißten Proben wurden in der Oberfläche mit Hilfe der Röntgenbeugung ermittelt. Die dazu verwendeten Parameter entsprechen denen in Tabelle 4. Für die in der Decklage mit LTT-Zusatz geschweißten Proben kam zusätzlich die Neutronenbeugung zum Einsatz. Mit diesem Verfahren lassen sich die Eigenspannungen im Probeninnern ermitteln. Entsprechende Messungen fanden am Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB) statt. Im Ergebnis stehen neben den Längs- und Quereigenspannungen auch die Eigenspannungen senkrecht dazu in Normalrichtung zur Verfügung. Der spannungsfreie Referenzzustand wurde anhand einer relaxierten Kammprobe aus dem Schweißnahtquerschnitt bestimmt. Tabelle 7 zeigt die für die Neutronenbeugungsexperimente festgelegten Mess- und Auswerteparameter.

Tabelle 7 Mess- und Auswerteparameter der neutronografischen Spannungsanalyse

Wellenlänge λ	0,1486 nm
Beugungslinie	Fe $\alpha\{211\}$
2θ	78°
Messvolumen	(2 mm × 2 mm × 2 mm) bis (2 mm × 10 mm × 3 mm)
Zählzeit	10 min bis 40 min
DEK	$s_1 = -1,27 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ und $\frac{1}{2}s_2 = 5,8 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$

5.2 Spannungsanalyse unter Einspannung

Bauteilschweißversuche

Im Bauteilschweißversuch wurde der LTT-Zusatz exklusiv zum Schweißen der Decklage, d. h. der letzten drei Raupen der 25 mm starken Stumpfnahthe Verbindung genutzt. Abbildung 26 zeigt den resultierenden Nahtaufbau. Deutlich zeichnen sich die Raupen der Decklage (LTT – hochlegiertes Schweißgut) gegenüber den konventionell geschweißten Fülllagen ab. Bereits durch die verwendete Ätzung wird deutlich, dass die chemische Entmischung zwischen den beiden Zusätzen bzw. dem Grundwerkstoff durch scharfe Übergänge zwischen den Raupen charakterisiert ist. Die mittels WDX ermittelte Verteilung der Hauptlegierungselemente Cr, Ni, Mn, Mo und C bestätigt dies, wie aus Abbildung 27 zu entnehmen ist. Im oberen Bereich, knapp unterhalb der Nahtoberfläche, liegt in allen drei Raupen eine M_s -Temperatur zwischen 200 °C und 300 °C vor. Dies entspricht den in den 8-mm-Blechen anzutreffenden Werten. Auch unterhalb der letzten Raupe zeigen die unteren Ausläufer der Decklage (Finger) noch entsprechend der chemischen Zusammensetzung herabgesetzte M_s -Temperaturen. Werte zwischen 200 °C und 300 °C liegen hier vor. In den Fülllagen unterhalb des LTT-Schweißgutes herrschen dann die für den konventionellen Zusatz typischen Umwandlungstemperaturen um 400 °C vor. Damit ist im Bereich der Decklage prinzipiell von der angestrebten Wirksamkeit des LTT-Zusatzes auf die Eigenspannungen auszugehen.

Die Härte im LTT-Schweißgut entspricht der bereits in den Schwingproben festgestellten, im Mittel etwa 440 HV0.1. Die Wärmewirkung der letzten Raupe führt in den benachbarten Bereichen zu einem Anlassen. Die Härte wird hierbei in einem schmalen Saum bis zu ca. 350 HV0.1 reduziert. Das Schweißgut ist martensitisch ohne nachweisbaren Anteil an Restaustenit.

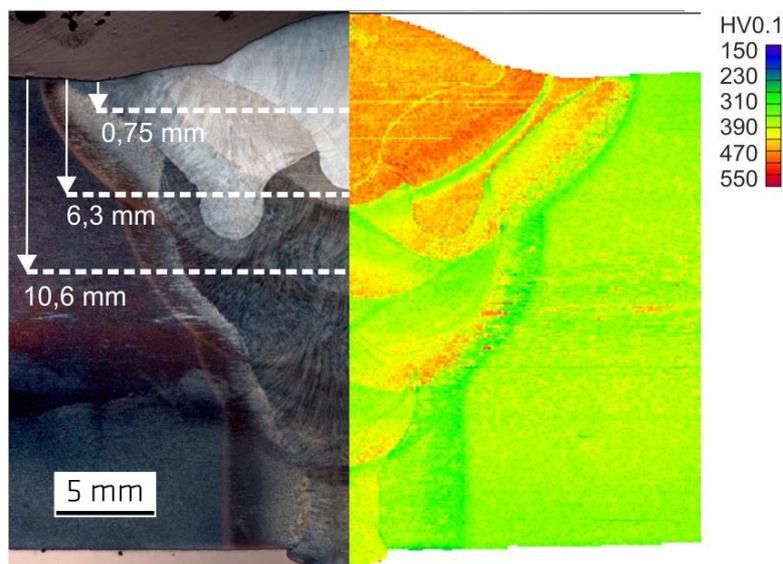


Abbildung 26 Querschliff mit Härteprofil der in der Decklage mit LTT-Zusatz geschweißten Probe und Pfade der WDX-Elementanalyse

Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der Schweißbedingungen und des Einspanngrades
Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and restraint

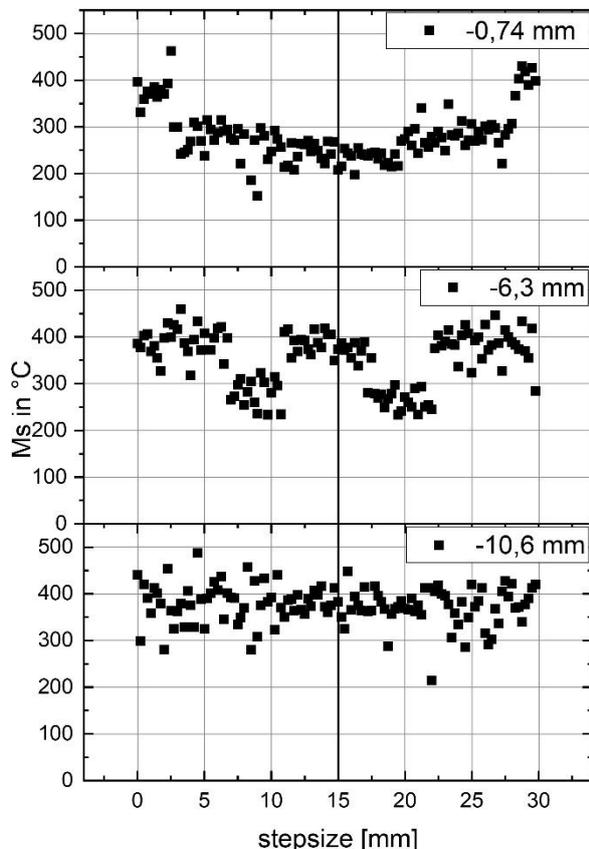


Abbildung 27 Auf der Elementverteilung entlang der in Abbildung 26 skizzierten Pfade basierende Berechnung der Ms-Temperatur nach [26]

Reaktionskräfte während des Schweißens

Das Schweißen in der 2-MN-Prüfanlage erlaubt die raupenspezifische Quantifizierung der sich aufgrund von behinderter Ausdehnung, Schrumpfung und Phasenumwandlung einstellenden Reaktionskräfte. Dies ist in Abbildung 28 für eine mit konventionellem Schweißzusatz im Vergleich zu der mit LTT-Zusatz in der Decklage gefügten 25-mm-Verbindung gegenübergestellt. Der jeweils angegebene Temperaturverlauf in der WEZ spiegelt die Wärmez- und -abfuhr beim Schweißen bzw. Abkühlen auf die Zwischenlagentemperatur (50°C) wider. Daraus resultiert ein zyklischer Kraftanstieg bzw. -abfall. Zugeführte Wärme infolge des Einbringens der einzelnen Raupen führt zu einem Kraftabfall. Das nachfolgend behinderte Schrumpfen der erwärmten Bereiche lässt die Kraft in Zugrichtung ansteigen. Dieser schrumpfbedingte Kraftanstieg ist stets größer als der beim Schweißen auftretende Abfall. Dies führt zu einer allmählichen Zunahme des Kraftniveaus mit fortschreitender Schweißung. Der größte Kraftanstieg ist nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur nachweisbar. Für den konventionellen Zusatz ergeben sich am Ende so 377 kN. Bezogen auf den Blechquerschnitt entspricht dies einer Reaktionsspannung in Nahtquerrichtung von 60 MPa. Die in der Decklage mit LTT-Zusatz geschweißte Verbindung zeigt ein qualitativ vergleichbares Ergebnis.

Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der Schweißbedingungen und des Einspanngrades

Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and restraint

Das Kraftniveau in den letzten drei Raupen erscheint gegenüber der konventionell geschweißten Verbindung jedoch etwas abgesenkt. Nach vollständigem Abkühlen auf Raumtemperatur stellt sich ein Reaktionskraftniveau von 351 kN ein. Bezogen auf den Blechquerschnitt entspricht dies einer Reaktionsspannung in Nahtquerrichtung von 55 MPa. Der Unterschied ist somit nur gering.

Dennoch lässt sich die lastabbauende Wirkung der martensitischen Phasenumwandlung in den drei LTT-Raupen nachweisen. Abbildung 29 zeigt den jeweiligen Kraft- und Temperaturverlauf exemplarisch während des Schweißens der 8. Raupe. Der Zeitpunkt des Schweißens (grau hinterlegt) kann über ein Signal der Schweißquelle dem Kraftverlauf eindeutig zugeordnet werden. Während die Kraftreduktion beim Wärmeeinbringen in beiden Fällen etwa 100 kN beträgt, zeigt sich die der schrumpfbedingten Kraftzunahme überlagerte Phasenumwandlung (LTT) in einem leicht verminderten Anstieg der Kraft, der jedoch das Gesamtkraftniveau nur geringfügig beeinflusst.

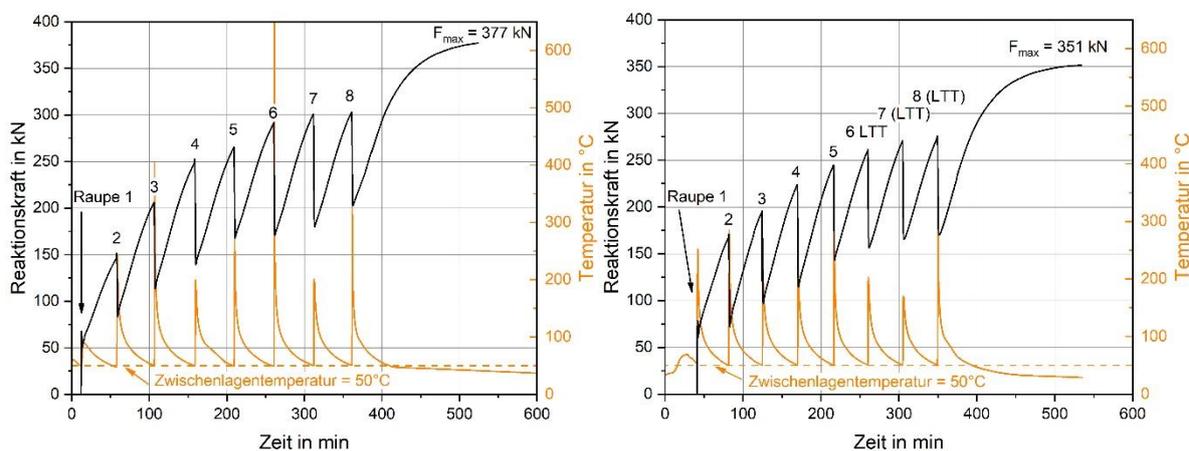


Abbildung 28 Reaktionskraft und Temperatur während des Schweißens, Grundwerkstoff S960 mit konventionellem Zusatz G Mn4Ni2 CrMo (links), mit LTT-Zusatz in den Raupen 6-8 (Decklage) (rechts)

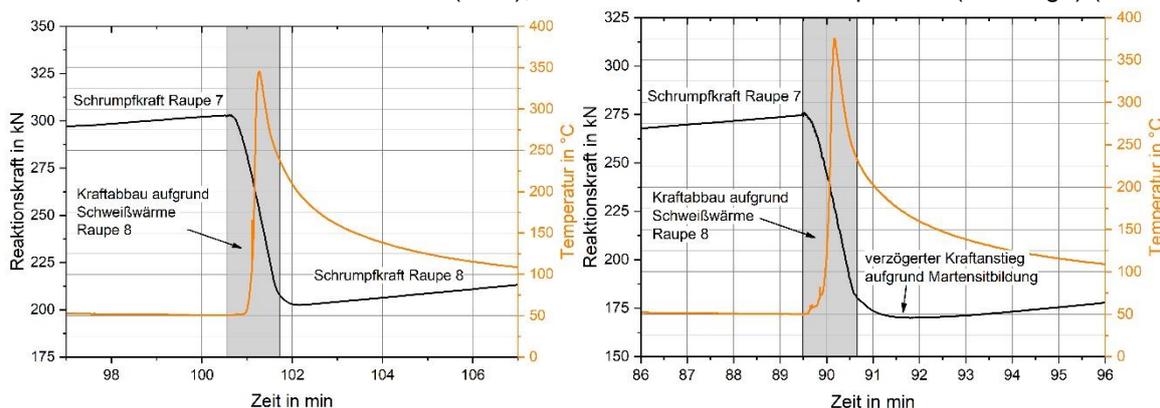


Abbildung 29 Reaktionskraft und Temperatur während des Schweißens der 8. Raupe, Grundwerkstoff S960 mit konventionellem Zusatz G Mn4Ni2 CrMo (links), LTT-Zusatz (rechts)

Aufgrund dieser nur geringen Reaktionskräfte wurden die geschweißten Proben hinsichtlich der lokalen Eigenspannungen nicht unter Einspannung in der 2-MN-Prüfanlage untersucht. Die röntgenografische Analyse erfolgte nach Entnahme aus dem

Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der Schweißbedingungen und des Einspanngrades Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and restraint

Prüfsystem. Damit verbunden ist eine rein elastische Relaxation der beobachteten Reaktionsspannungen über der gesamten Probe. Die röntgenografische Eigenspannungsermittlung außerhalb des Prüfsystems erlaubt die höhere Ortsauflösung in mehreren Richtungen (längs + quer) und wurde daher gegenüber der eingespannten Variante bevorzugt.

Eigenspannungen in der Oberfläche

Die Längseigenspannungen in der mit konventionellem Zusatz geschweißten Probe zeigen in der gesamten Schweißgutoberfläche Zugeigenspannungen (Abbildung 30). Das Eigenspannungsniveau erreicht maximal 500 MPa und ist in Nahtmitte (letzte Raupe) durch eine leichte Einsattelung gekennzeichnet. Zur WEZ hin liegt ein hoher Gradient vor. Die Eigenspannungen liegen dort zwischen 200 MPa und -200 MPa. Der umgebende Grundwerkstoff ist durch Druckeigenspannungen um -300 MPa aufgrund des Reinigungsstrahlens gekennzeichnet. Dies gilt auch für die Quereigenspannungen im Grundwerkstoff einschließlich der WEZ. Im Unterschied zur Längsrichtung finden sich in den beiden äußeren Raupen der Decklage jedoch Druckeigenspannungsspitzen um etwa -300 MPa. In Nahtmitte herrschen Zugeigenspannungen bis maximal 500 MPa vor.

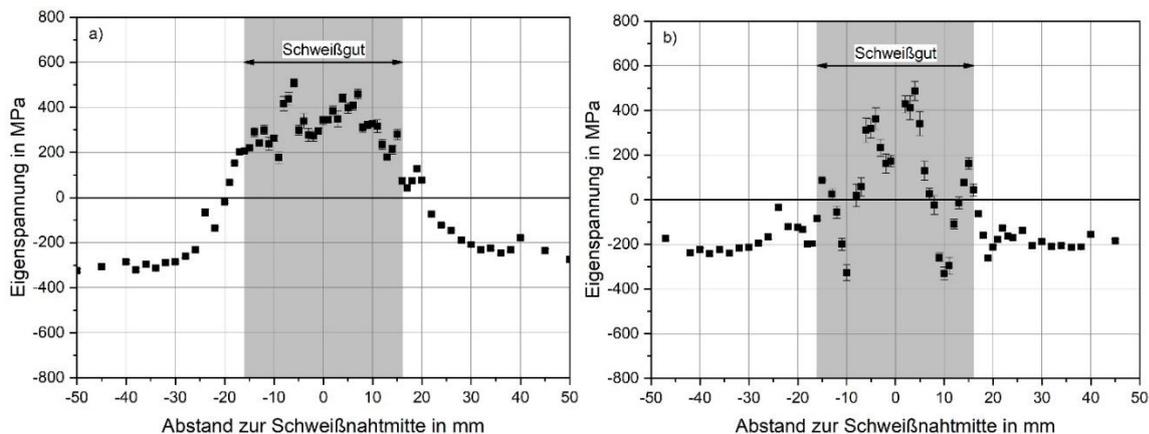


Abbildung 30 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfnähte mit V-Naht, Blechdicke 25 mm, Werkstoff S690+G Mn4Ni2 CrMo

Die mit LTT-Zusatz gefertigte Decklage weist in Längsrichtung ein geringeres Eigenspannungsniveau auf (Abbildung 31). Maximal sind 300 MPa auszumachen, auch leichte Druckeigenspannungen von etwa -100 MPa liegen örtlich vor. Die WEZ und der Grundwerkstoff gleichen der konventionellen Verbindung. Auch die Querrichtung unterscheidet sich mit LTT-Zusatz praktisch nicht von der konventionell geschweißten Variante. Allerdings liegen im äußeren Schweißgut hier Druckeigenspannungen bis -600 MPa vor. Ein steiler Gradient in Richtung Schweißnahtmitte endet mit Zugeigenspannungen um 500 MPa. Das Eigenspannungsniveau in Längsrichtung ist im LTT-Fall etwas niedriger. WEZ und Grundwerkstoff unterscheiden sich hinsichtlich des verwendeten Zusatzwerkstoffes praktisch nicht.

Auch der Vergleich der Eigenspannungen zwischen den Schwingproben (8 mm) und den Bauteilproben (25 mm) offenbart kaum Unterschiede bei Verwendung des LTT-Zusatzes bezogen auf das Niveau als auch auf die Verteilung der Eigenspannungen in WEZ und Grundwerkstoff.

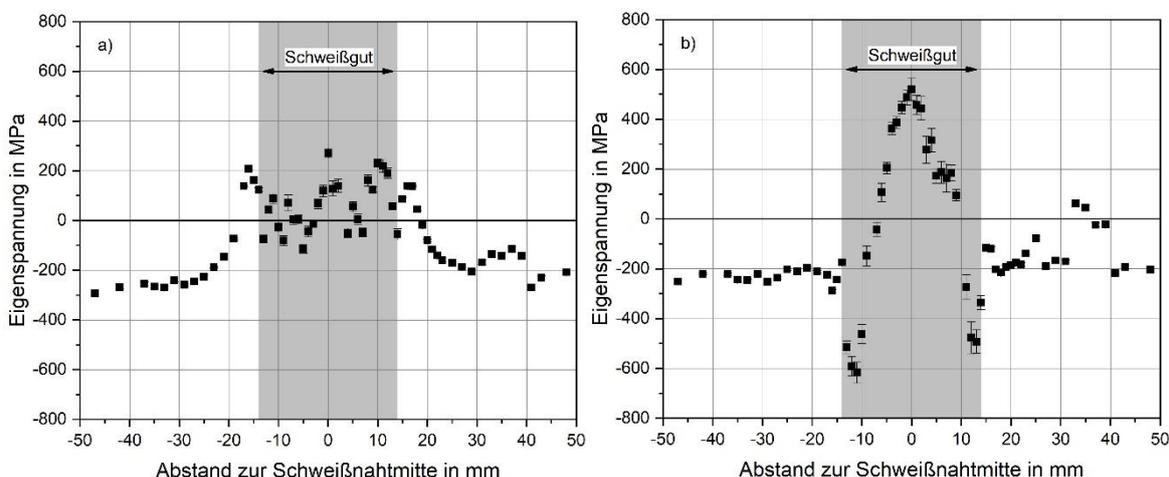


Abbildung 31 Längs- a) und Quereigenspannungen b) in der Oberfläche der Stumpfnähte mit V-Naht, Blechdicke 25 mm, Werkstoff S690+G Mn4Ni2 CrMo (Raupe 1-5), LTT-Zusatz (Raupe 6-8)

Eigenspannungen im Volumen

Mittels Neutronenbeugung wurde abschließend untersucht, welche Eigenspannungen im Innern der mit LTT-Zusatz in der Decklage geschweißten Verbindung vorliegen. Abbildung 32 zeigt schematisch die Messlinien im Querschliff entlang derer die Eigenspannungen längs, quer und normal zur Schweißrichtung ermittelt wurden. Die Darstellung der flächenhaften Eigenspannungen in den Teilbildern verdeutlicht, dass das Eigenspannungsprofil durch die Kontur der drei LTT-Raupen wiedergegeben wird. Die höchsten Druckeigenspannungen finden sich unmittelbar unter der Oberfläche in Längsrichtung. Maximal -420 MPa liegen hier in der Nahtmitte vor. Mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche nehmen die Beträge der Eigenspannungen graduell ab. Bei etwa -4,5 mm Tiefe formieren sich in den unteren Bereichen der LTT-Raupe bereits geringe Zugeigenspannungen. Auch in den Randbereichen rechts und links der mittleren Raupe dominieren Zugeigenspannungen, welche aus Gleichgewichtsgründen Werte um 400 MPa annehmen. In einem Abstand von -7,5 mm zur Oberfläche liegen unterhalb der mittleren Raupe sehr hohe Zugeigenspannungen im Bereich der Streckgrenze des Zusatzwerkstoffes vor. Die unteren Ausläufer der beiden außermittigen LTT-Raupen sind jeweils von Zugeigenspannungen von etwa 400 MPa gekennzeichnet. In Normal- und Querrichtung sind die Eigenspannungen qualitativ ähnlich verteilt. Deren Niveau ist jedoch insbesondere in Querrichtung gegenüber den Längseigenspannungen reduziert.

Im Gegensatz zur Schweißnahtoberfläche ist das LTT-Schweißgut im Innern vorrangig durch Druckeigenspannungen charakterisiert. Die umgebenden Bereiche lassen hingegen, teils sehr hohe, Zugeigenspannungen erkennen. Der spannungsabbauende Effekt der Phasenumwandlung konzentriert sich demnach vorrangig im Volumen des Schweißgutes selbst. Benachbarte Bereiche (WEZ und angrenzendes Schweißgut)

Untersuchung der Eigenspannungsentstehung in Abhängigkeit der Schweißbedingungen und des Einspanngrades

Investigations on residual stress generation depending on welding conditions and restraint

profitieren hinsichtlich der Eigenspannungshöhe im vorliegenden Fall nicht davon. Im Gegenteil, gleichgewichtsbedingte Zugeigenspannungen stellen sich hier ein.

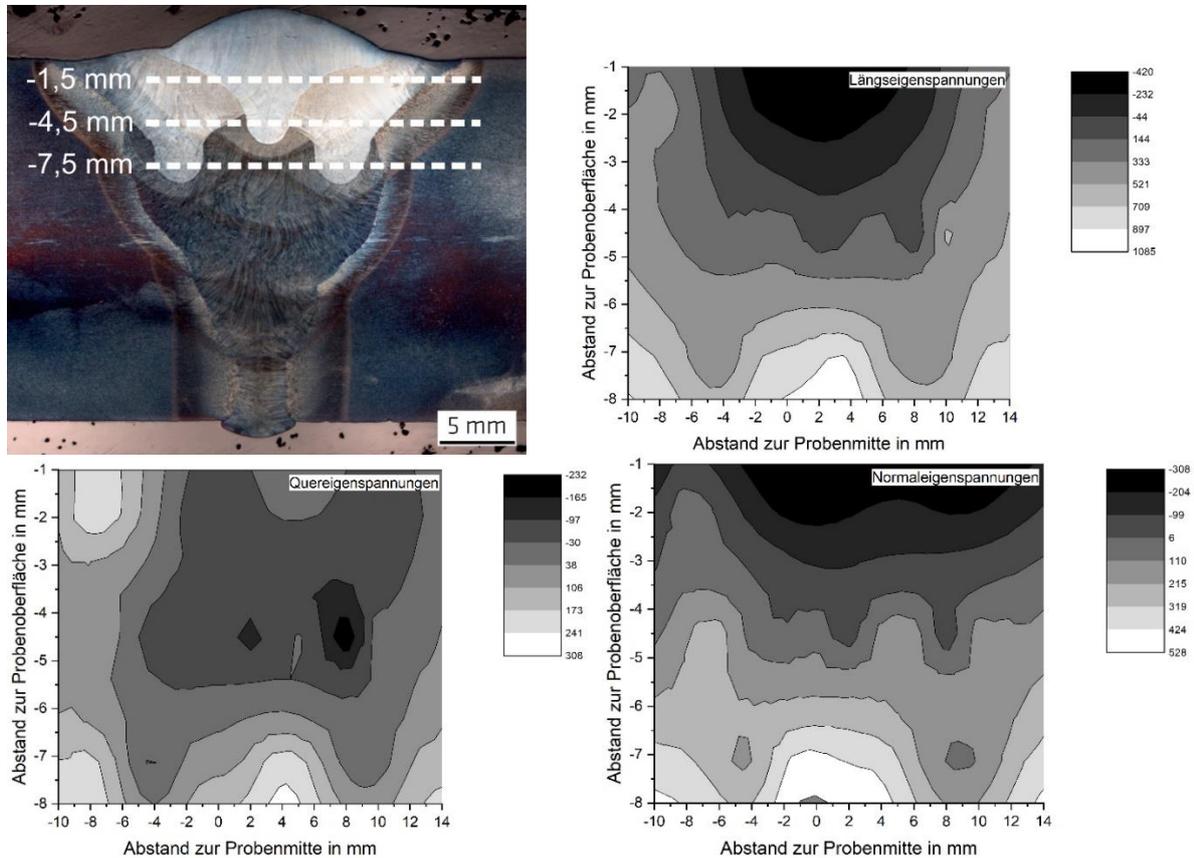


Abbildung 32 Längs-, Quer- und Normaleigenspannungen in unterschiedlichen Tiefen gemäß der Pfade im Schlifffbild, Stumpfnähte mit V-Naht, Blechdicke 25 mm, Werkstoff S690+G Mn4Ni2 CrMo (Raupe 1-5), LTT-Zusatz (Raupe 6-8)

6 Schwingfestigkeitsuntersuchungen Fatigue testing

Kurzfassung

Die Schwingfestigkeit konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen wurde im Wöhlerversuch ermittelt und verglichen. Es wurden die Stoßformen Stumpf-, Kreuz-, Überlappstoß sowie die Längssteife untersucht. Weiter wurde der Einfluss des hochfesten Grundwerkstoffs S960Q im Vergleich zum normalfesten S355J2+N getestet. Es zeigte sich, dass die Verwendung des LTT-Zusatzwerkstoffes sowohl zu einem Anstieg als auch einer Verringerung der Schwingfestigkeit führen kann, bzw. kaum Effekt haben kann. Wurde eine Schwingfestigkeitssteigerung beobachtet, fiel diese beim hochfesten Stahl S960Q höher aus, als beim S355J2+N.

Abstract

Conventional and LTT-welded welded samples were fatigue tested. Joint types used were butt weld, cruciform and overlap joint as well as longitudinal stiffener. Base metals used were regular construction steel S355J2+N as well as high strength fine grained steel S960Q. The use of LTT-filler metal in some cases had positive effect on the fatigue strength but also negative effect in others. The fatigue strength enhancement was higher for high strength steel S960Q compared to S355J2+N.

6.1 Methode Method

Die Untersuchung des Schwingfestigkeitsverhaltens der Schweißverbindungen erfolgte im Wöhlerversuch. Die Ergebnisse dienen der vergleichenden Beurteilung von konventionell und LTT-geschweißten Verbindungen unter Berücksichtigung des Eigenspannungseinflusses und der beanspruchungsabhängigen Eigenspannungsstabilität. Im Einzelnen sind Versuche an folgenden Stoßarten durchgeführt worden:

- Stumpfstoß, ausgeführt als V-Naht,
- Stumpfstoß, ausgeführt als DY-Naht mit unverschweißtem Wurzelspalt (1,5 mm bis 2 mm Reststeg),
- Kreuzstoß, ausgeführt als HV-Naht mit Badsicherung,
- Überlappstoß, einseitige Kehlnaht,
- Überlappstoß, beidseitige Kehlnaht.

Ergänzend wurden Längssteifen mit zusätzlicher Umschweißung der Stirnseite (konventionell und LTT-Schweißgut) geprüft. Weiter wurden LTT-geschweißte Stumpfnähte mittels hochfrequentem Hämmerverfahren Pit (HFMI) sowie WIG-Wiederaufschmelzen nachbehandelt.

Die Versuche an LTT-Schweißnähten wurden unter Verwendung beider Versuchswerkstoffe S355J2+N und S960Q durchgeführt. Versuche an konventionell geschweißten Verbindungen beschränkten sich aufgrund des hier nicht erwartbaren Werkstoffeinflusses infolge starker Kerbwirkung größtenteils auf den Werkstoff S355J2+N.

Die Versuche erfolgten kraft geregelt in servohydraulischen Prüfrahmen. Die Beanspruchung wurde als sinusförmiger Kraft-Zeitverlauf bei einem Spannungsverhältnis $R = 0,1$ quer zur Schweißnaht aufgebracht. Die Walzrichtung der verwendeten Grobbleche entsprach der Beanspruchungsrichtung. Alle Versuche wurden bis zum Probenbruch durchgeführt. Die Prüffrequenz betrug bei allen Versuchen in Abhängigkeit der aufzubringenden Oberspannung etwa 8 Hz bis 20 Hz. Proben ohne Bruch wurden bei Erreichen von 5 Millionen Lastwechseln als Durchläufer gewertet. Stichprobenartig erfolgte die Beanspruchung auch bis 10 Millionen Lastwechseln.

Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgte mittels linearer Regression und Minimierung der Fehlerquadrate in Lastwechselrichtung (Methode A nach ISO 14345) ohne Berücksichtigung der Durchläufer.

Die Versuche wurden im Nennspannungskonzept bewertet. Die Ergebnisse werden im Folgenden auf Basis der Schwingbreite $\Delta\sigma$ ($\Delta\sigma = 2\sigma_a$) dargestellt. Als Referenz wird in den Ergebnisdiagrammen die dem Schweißdetail zugehörige FAT-Bemessungswöhlerlinie nach IIW dargestellt.

6.2 Schwingversuche an S355J2+N

Fatigue testing of welds made from S355J2+N

6.2.1 Stumpfstöße aus S355J2+N

Butt welds made from S355J2+N

Die Schwingfestigkeitsergebnisse an Stumpfstößen mit V-Naht sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 gezeigt. Die Schwingfestigkeit beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 116$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50\%$). Durch Verwendung des LTT-Zusatzwerkstoffes steigt dieser Wert auf etwa 180 MPa an. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden beträgt im Schweißzustand etwa $k = 3$ bzw. bei LTT-geschweißten Verbindungen $k = 5$. Der Schwingfestigkeitsgewinn ist vornehmlich im Bereich hoher Lastwechselzahlen nachzuweisen. Bei etwa $N < 300.000$ Lastwechseln fallen die Ergebnisse in ein Streuband. Beide Versuchsreihen zeigen erwartungsgemäß den Anrissort des Schwingrisses an der Nahtwurzelkerbe. Im Vergleich zur FAT 71 nach IIW liegen alle Versuchsergebnisse auf der konservativen Seite.

Die Ergebnisse der Stumpfnähte mit DY-Naht und unverschweißtem Wurzelspalt sind in Abbildung 35 und Abbildung 36 gezeigt. Die Proben mit konventionellem Schweißgut zeigten Versagen sowohl von der unverschweißten Nahtwurzel als auch vom Nahtübergang. Die LTT-geschweißten Proben zeigten ausnahmslos Nahtwurzelversagen. Die Schwingfestigkeit bei 2 Millionen Lastwechseln beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 143$ MPa (Nahtübergangversagen) bzw. $\Delta\sigma = 75$ MPa (Nahtwurzelversagen). Die Schwingfestigkeit der LTT-geschweißten Verbindungen beträgt etwa $\Delta\sigma = 94$ MPa. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden der Versuchsreihen ist mit $k = 2,4$ bzw. $2,9$ und $k = 3,3$ vergleichbar. Im Bereich $N < 500.000$ Lastwechsel

sind die Ergebnisse von konventionell und LTT-geschweißten Verbindungen ebenfalls vergleichbar. Die IIW FAT 90 (Nahtübergangsversagen) bzw. FAT 36 (Nahtwurzelversagen) bewerten die Ergebnisse konservativ.

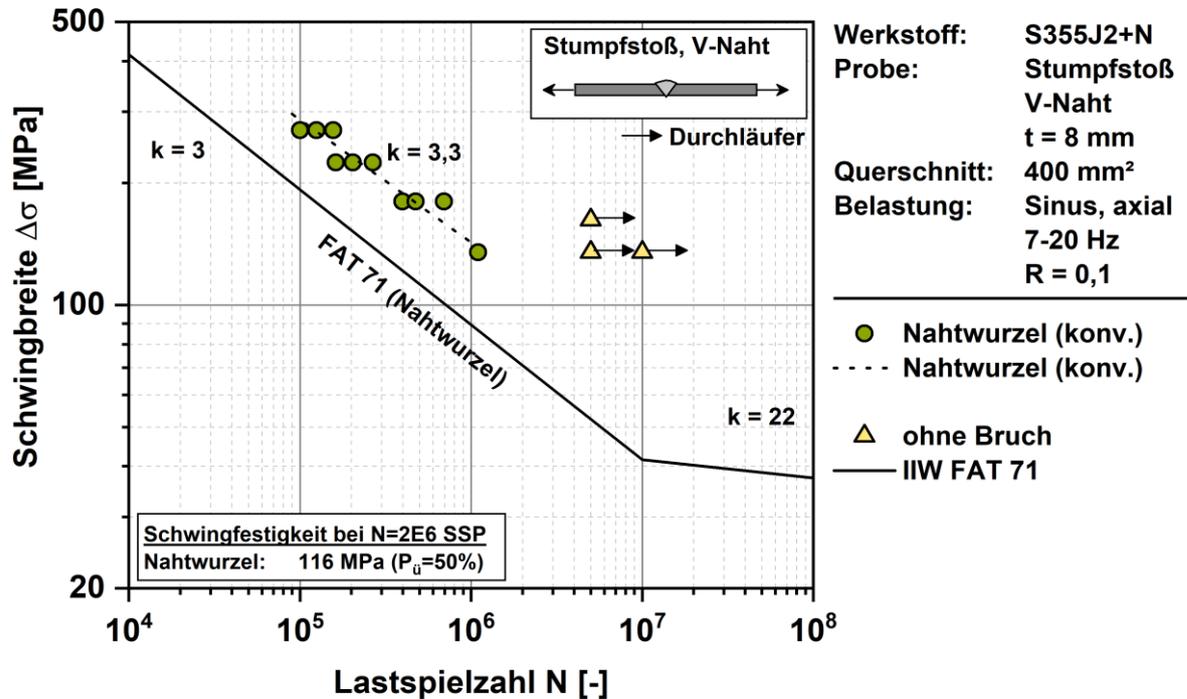


Abbildung 33 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Stumpfnahten (V-Naht) aus S355J2+N

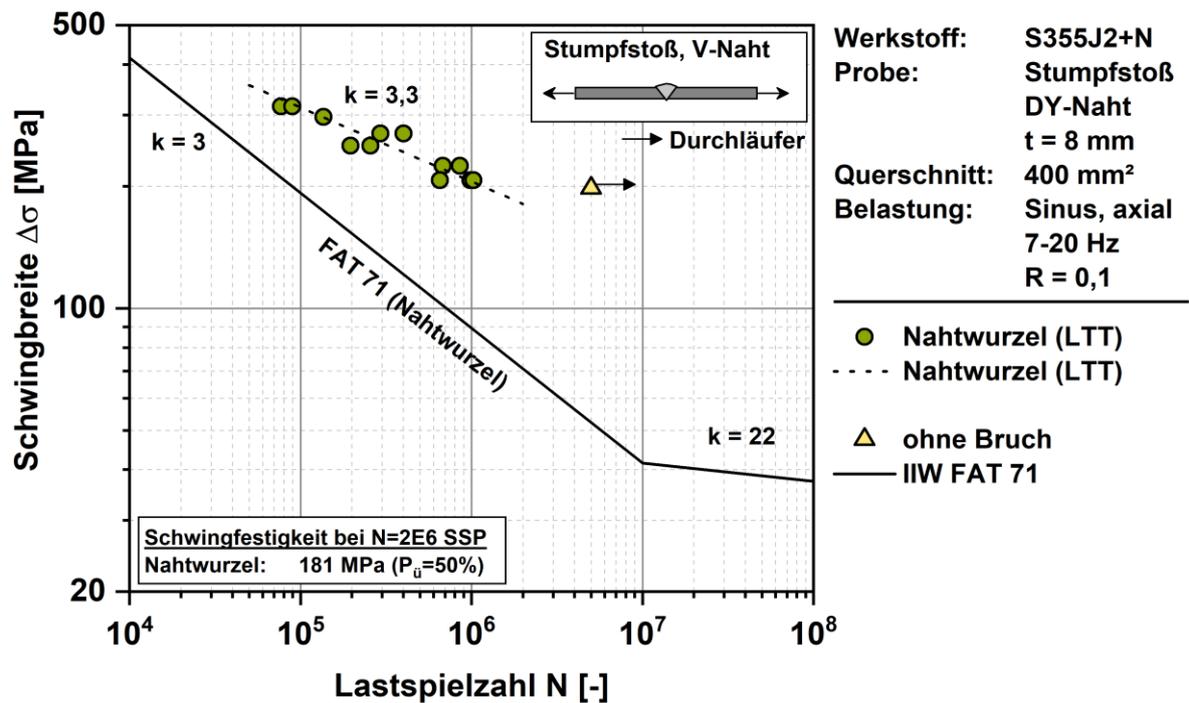


Abbildung 34 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnahten (V-Naht) aus S355J2+N

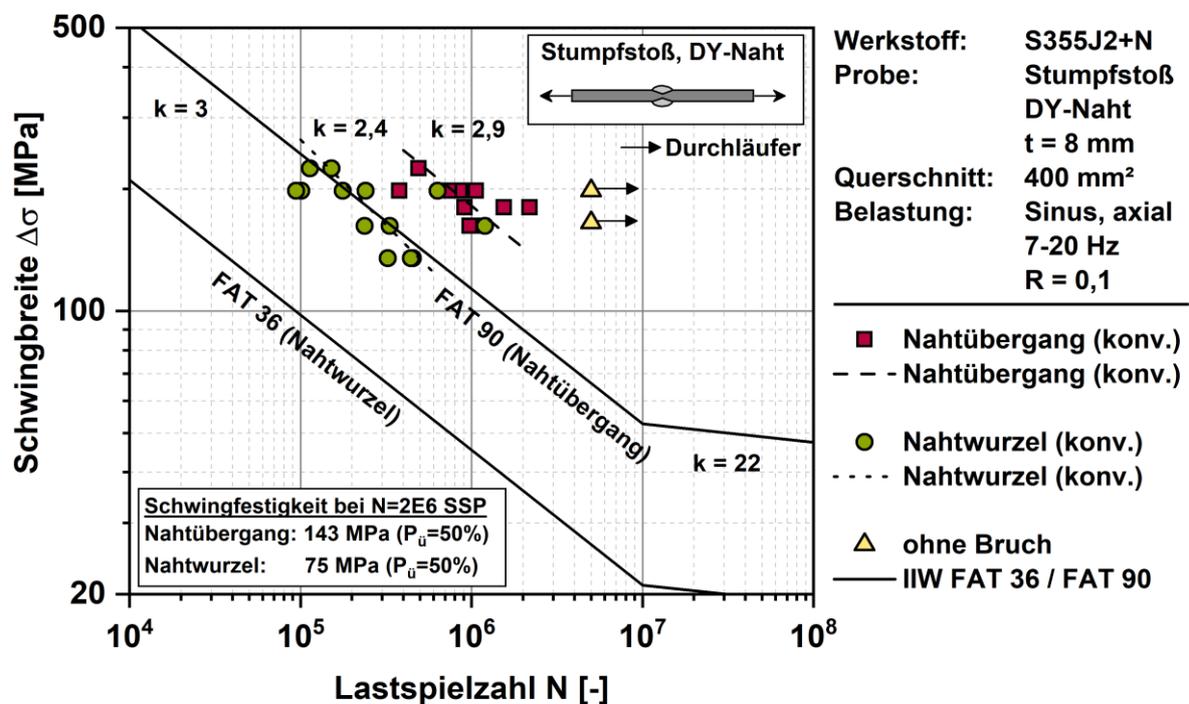


Abbildung 35 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Stumpfnahten (DY-Naht) aus S355J2+N

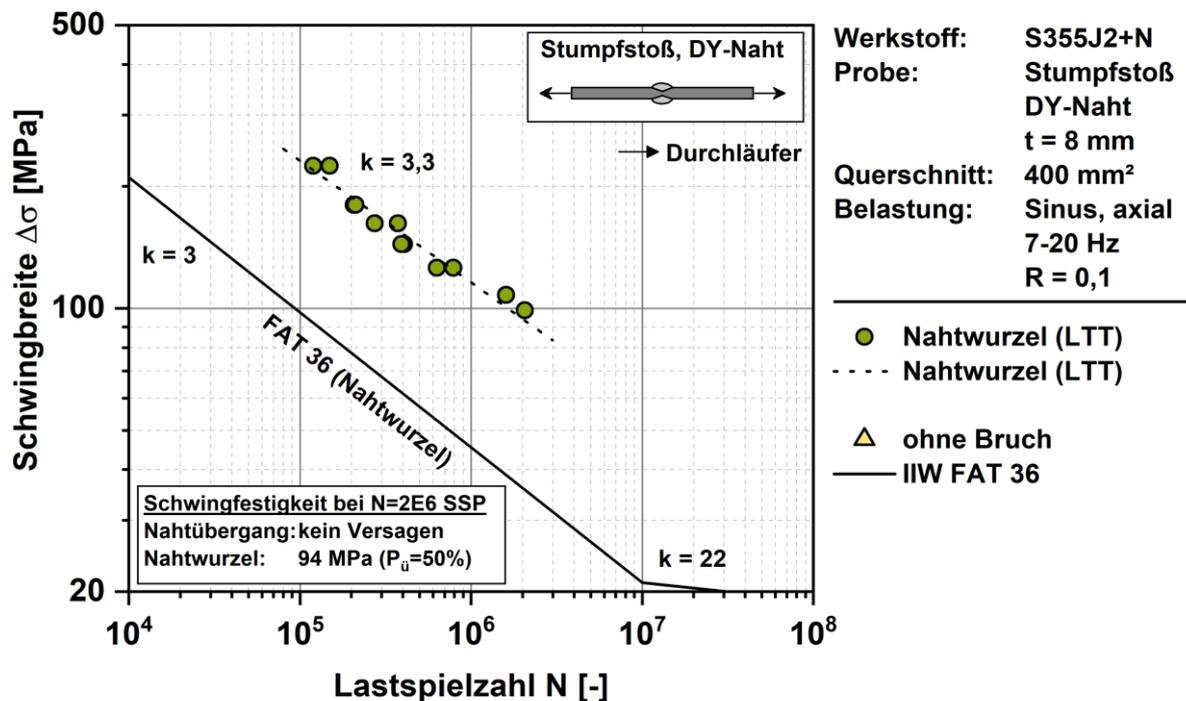


Abbildung 36 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnahten (DY-Naht) aus S355J2+N

6.2.2 Kreuzstöße aus S355J2+N Cruciform joints made from S355J2+N

Die Schwingfestigkeitsergebnisse an Kreuzstößen mit HV-Naht sind in Abbildung 37 und Abbildung 38 gezeigt. Beide Versuchsreihen zeigen erwartungsgemäß den Anrissort des Schwingrisses an der Nahtwurzelkerbe. Die Schwingfestigkeit beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 155$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50\%$). LTT-geschweißte Kreuzstöße zeigen einen geringeren Wert $\Delta\sigma = 91$ MPa. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden ist bei konventioneller Schweißung mit etwa $k = 14$ bzw. sehr flach. Bei LTT-geschweißten Verbindungen liegt diese bei etwa $k = 3$. Die erhöhte Schwingfestigkeit der konventionell geschweißten Verbindungen ist aufgrund der flachen Neigung nur im Bereich hoher Lastwechselzahlen wirksam.

Im Vergleich zur FAT 71 nach IIW liegen die meisten Versuchsergebnisse auf der konservativen Seite. Allerdings führt die flache Neigung konventionell geschweißter Kreuzstöße dazu, dass bei niedrigen Lastwechselzahlen (etwa $N < 200.000$) die Bewertung nach IIW FAT 71 nicht konservativ ist. Ursächlich hierfür kann die Form der verwendeten keramischen Badsicherung gewesen sein. Die Bewertung nach IIW FAT 36 (mögliche Wurzelfehler) wäre konservativ.

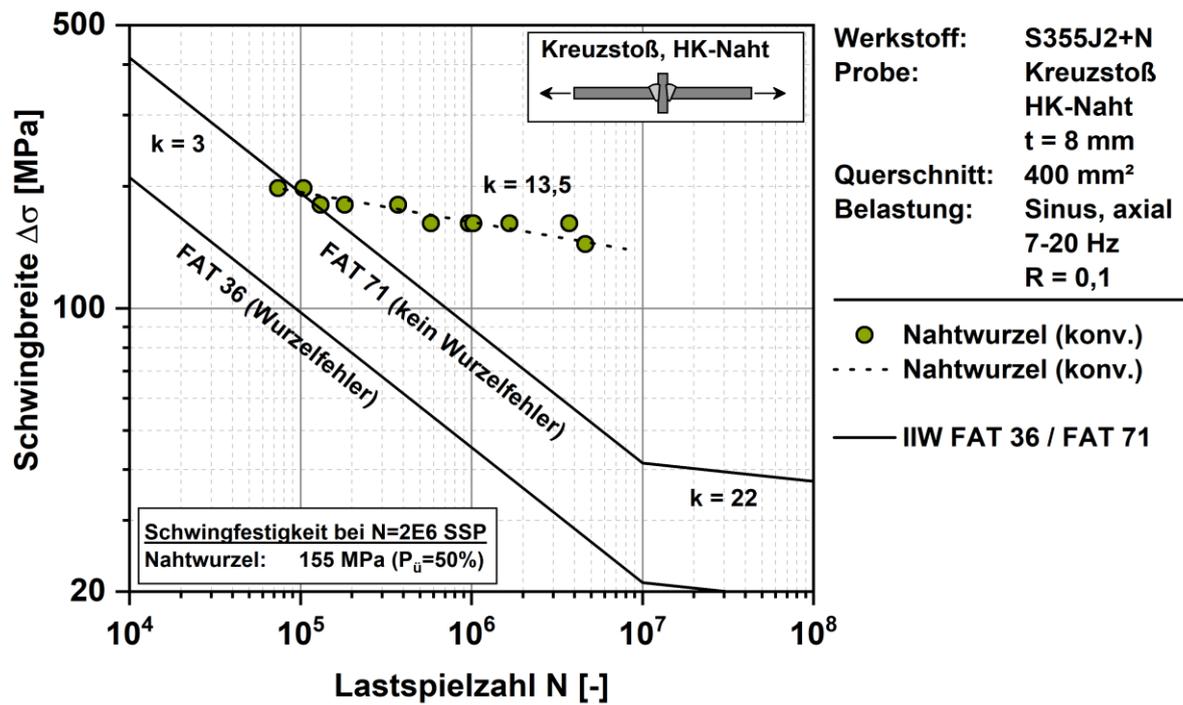


Abbildung 37 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Kreuzstößen aus S355J2+N

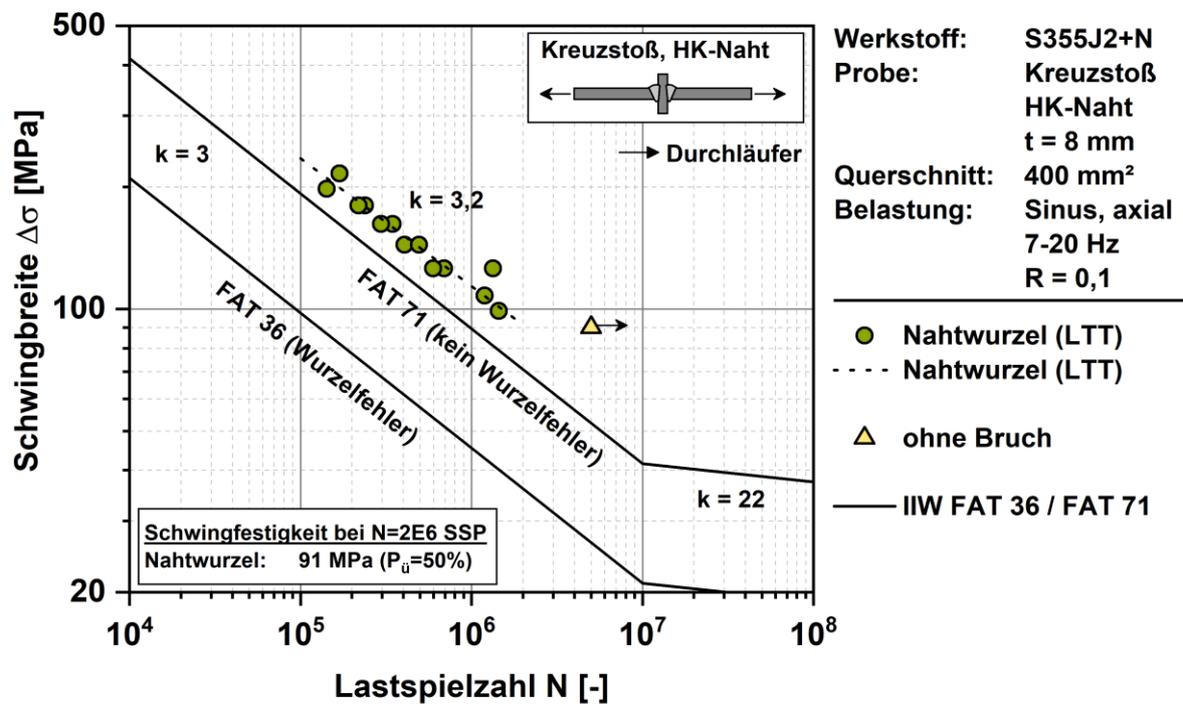


Abbildung 38 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Kreuzstößen aus S355J2+N

6.2.3 Überlappstöße aus S355J2+N Overlap joints made from S355J2+N

Die Schwingfestigkeit einseitig geschweißter Überlappstöße (Kehlnaht) sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 gezeigt. Der Schwingriss ging bei konventionell geschweißten Verbindungen sowohl von der Nahtwurzel- als auch der Nahtübergangskerbe aus. LTT-geschweißte Verbindungen versagten ausschließlich ausgehend vom Nahtübergang. Die Schwingfestigkeit beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 43$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50$ %). LTT-geschweißte Kreuzstöße zeigen einen vergleichbaren Wert $\Delta\sigma = 49$ MPa. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden variiert leicht, sie beträgt im Schweißzustand etwa $k = 4$ bzw. bei LTT-geschweißten Verbindungen etwa $k = 5$.

Ergebnisse beidseitig geschweißter Überlappstöße sind in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt. Der Rissausgangsort lag mehrheitlich am Nahtübergang, teilweise bei LTT-geschweißten Verbindungen jedoch auch im Grundwerkstoff. Die Schwingfestigkeit beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 49$ MPa. LTT-geschweißte Kreuzstöße zeigen einen höheren Wert i.H.v. $\Delta\sigma = 84$ MPa. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden konventionell geschweißter Verbindungen ist etwas flacher, sie beträgt im Schweißzustand etwa $k = 4$ bzw. bei LTT-geschweißten Verbindungen etwa $k = 3$.

Die FAT 36 IIW bzw. FAT 63 beschreiben die Versuchsergebnisse nicht konservativ. Dies kann mit der einschnittigen Ausführung des Überlappstoßes erklärt werden, da die IIW Bemessungswöhlerlinie für eine zweischnittige Verbindung gültig ist. Die Berücksichtigung der Außermittigkeit mithilfe von Korrekturfaktoren nach IIW zur Ermittlung der Nennspannungsamplitude hat sich in diesem Fall als nicht zielführend erwiesen. Eine Bewertung unter Berücksichtigung der Außermittigkeit findet mit dem Kerbspannungskonzept statt (Abschnitt 6.5).

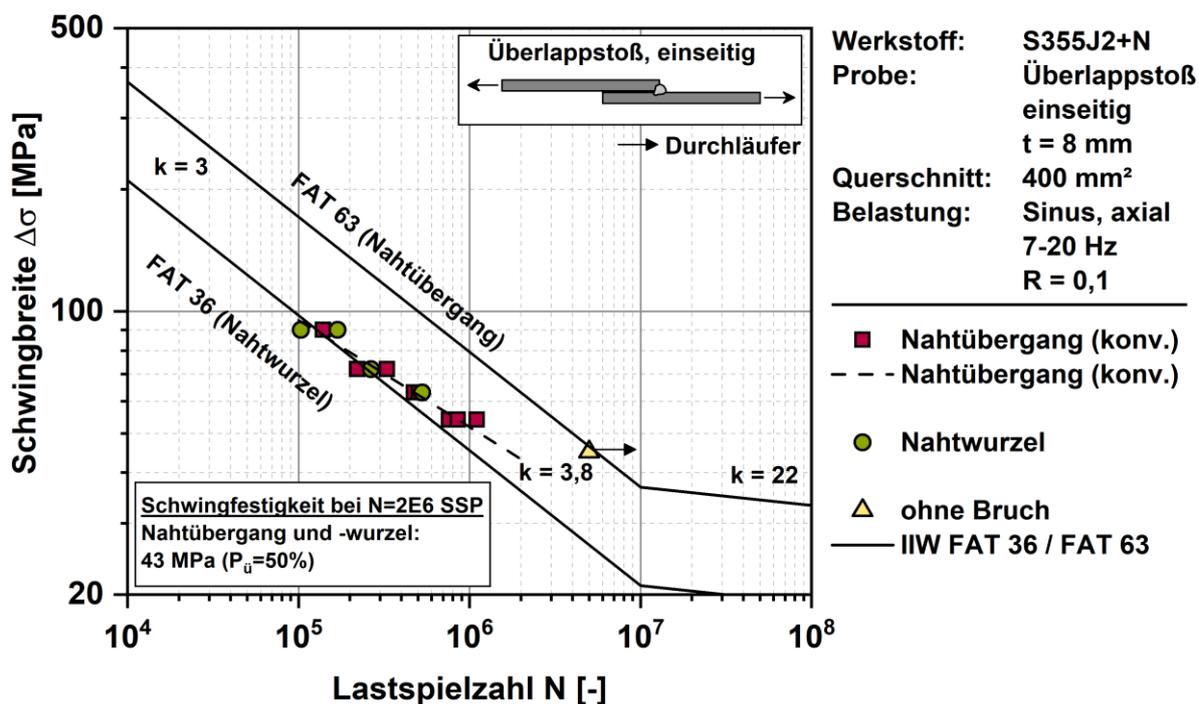


Abbildung 39 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an einseitig konventionell geschweißten Überlappstößen aus S355J2+N

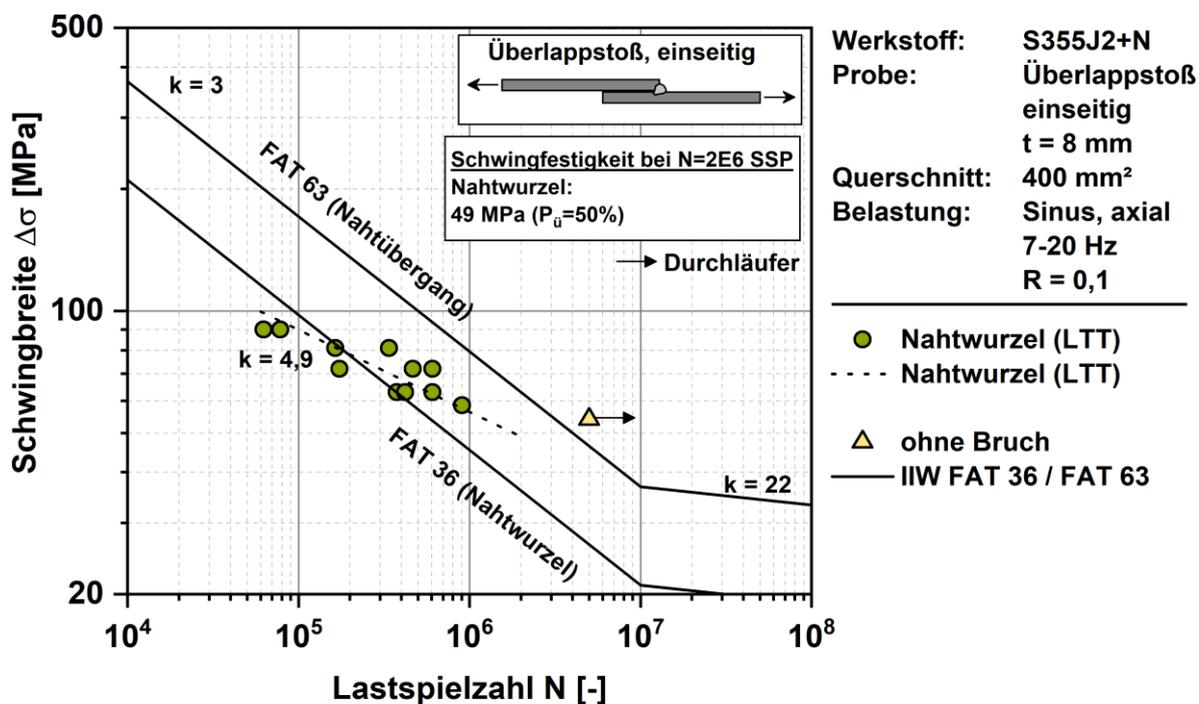


Abbildung 40 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an einseitig LTT-geschweißten Überlappstößen aus S355J2+N

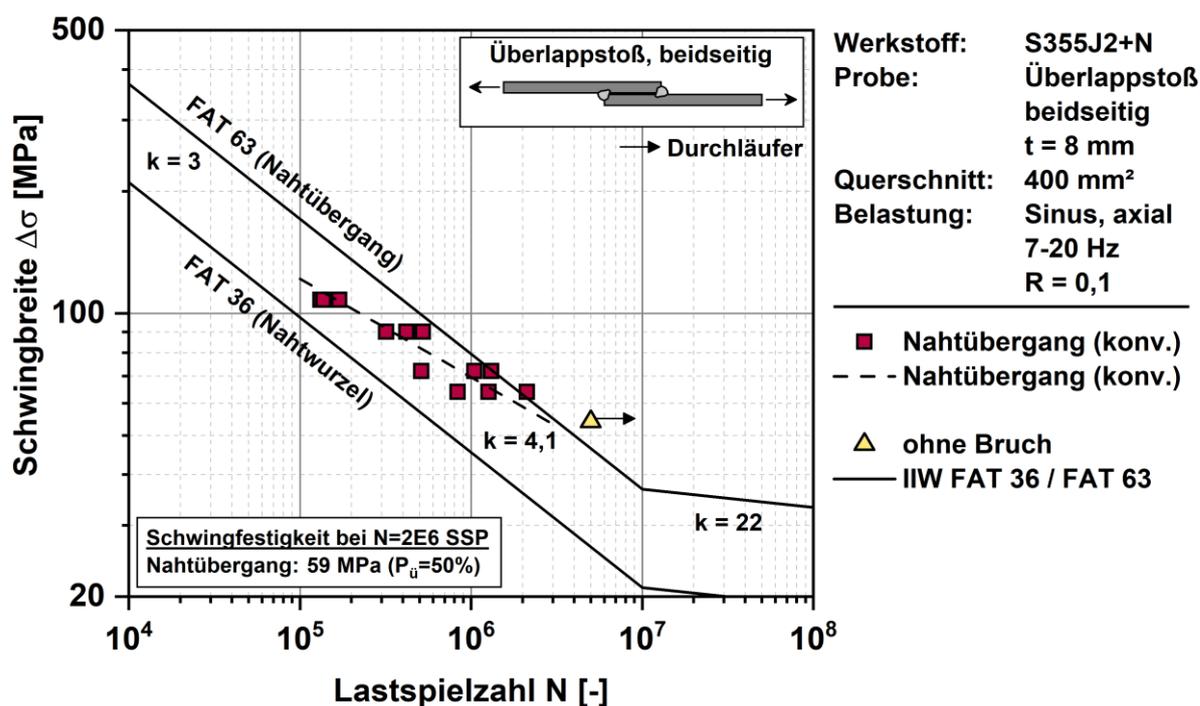


Abbildung 41 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an beidseitig konventionell geschweißten Überlappstößen aus S355J2+N

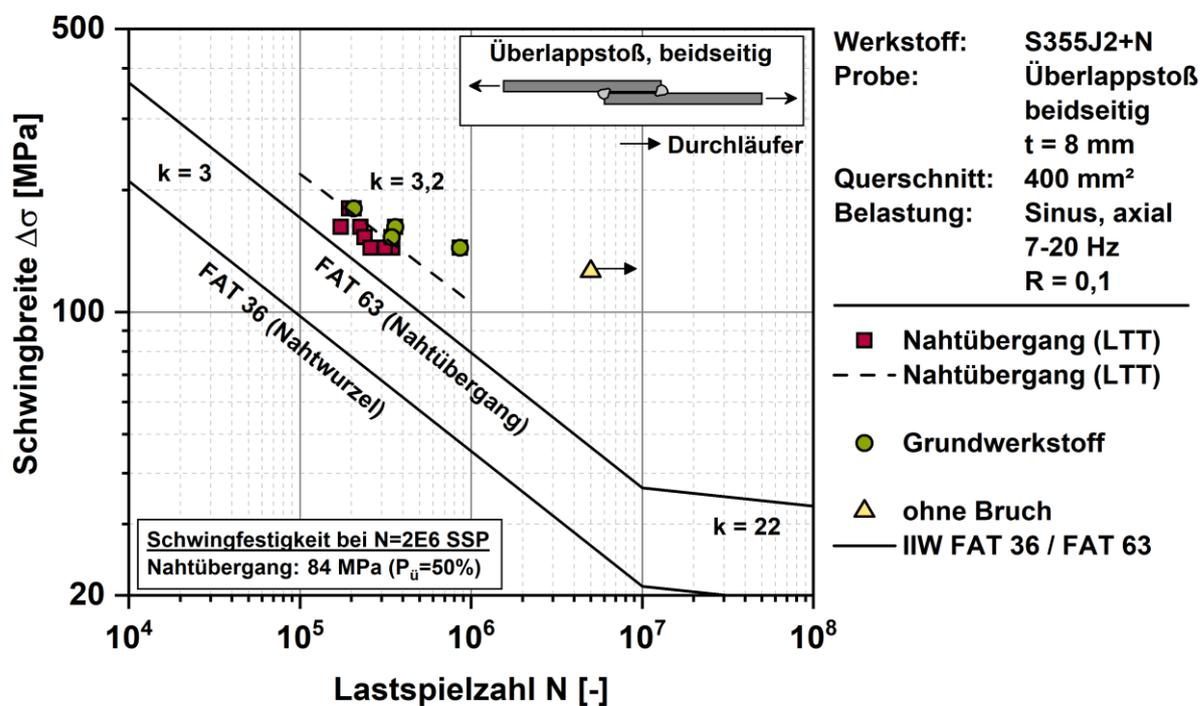


Abbildung 42 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an beidseitig LTT-geschweißten Überlappstößen aus S355J2+N

6.2.4 Längssteifen aus S355J2+N Longitudinal stiffener made from S960Q

Die Schwingfestigkeitsergebnisse von Längssteifen mit zusätzlicher Schweißlage im Bereich der Stirnseite sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 gezeigt. Die Schwingfestigkeit beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 86$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50\%$). LTT-geschweißte Längssteifen zeigen einen höheren Wert $\Delta\sigma = 142$ MPa. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden beträgt im Schweißzustand etwa $k = 3$, bei LTT-geschweißten Verbindungen etwa $k = 6$. Die erhöhte Schwingfestigkeit der konventionell geschweißten Verbindungen ist im gesamten untersuchten Zeitfestigkeitsbereich wirksam.

Im Vergleich zur FAT 63 nach IIW liegen die Versuchsergebnisse auf der konservativen Seite.

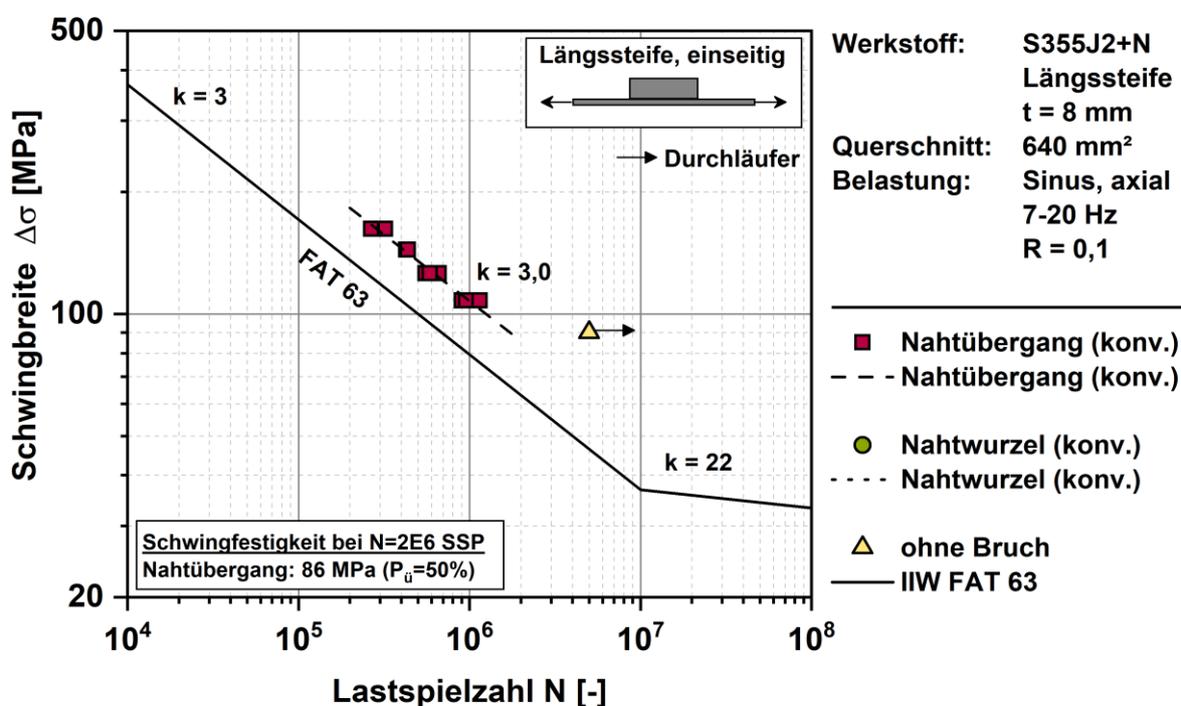


Abbildung 43 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Längssteifen mit zusätzlicher konventioneller Lage im Bereich der Stirnseite aus S355J2+N

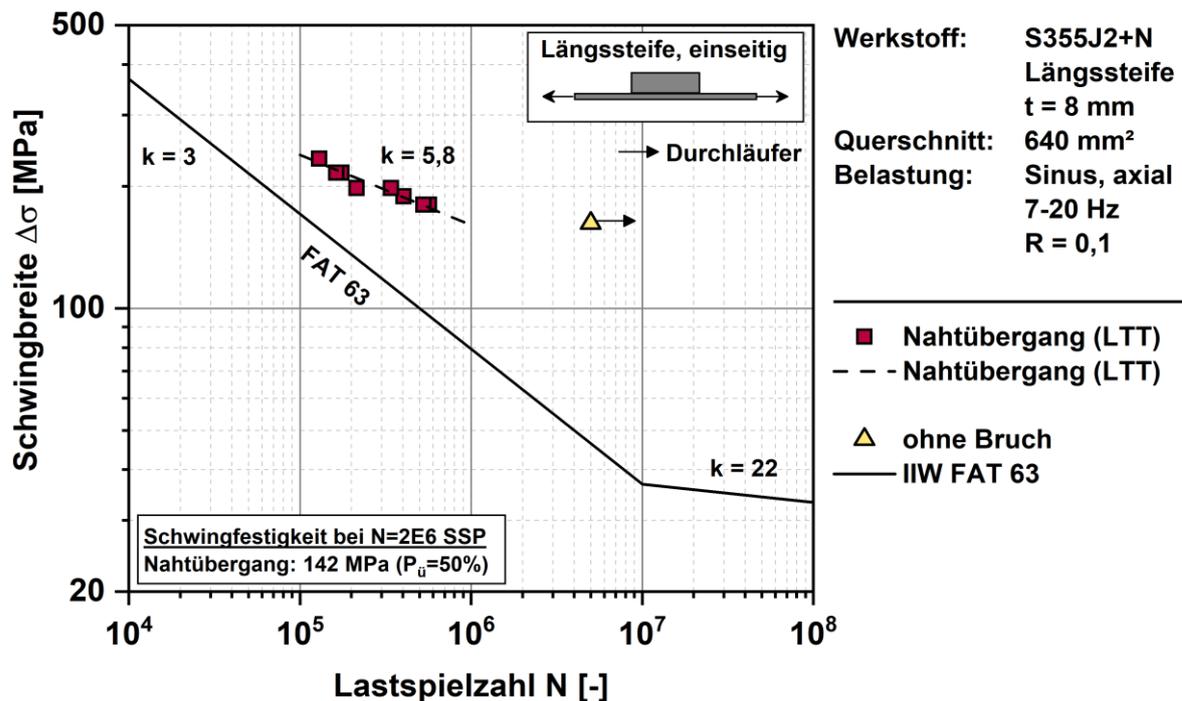


Abbildung 44 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Längssteifen mit zusätzlicher LTT-Lage im Bereich der Stirnseite aus S355J2+N

6.3 Schwingversuche an Schweißnähten aus S960Q Fatigue testing of welds made from S960Q

6.3.1 Stumpfstöße aus S960Q Butt welds made from S960Q

Die Schwingfestigkeitsergebnisse an Stumpfstößen mit V-Naht sind in Abbildung 45 und Abbildung 46 gezeigt. Die Schwingfestigkeit beträgt im LTT-geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 219 \text{ MPa}$ bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50 \%$). Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden beträgt etwa $k = 8$. Konventionell geschweißte Verbindungen aus S960Q wurden nicht geprüft, die Ergebnisse sind erfahrungsgemäß vergleich mit denen des S355J2+N (Abbildung 33). Der Anrissort des Schwingrisses lag an der Nahtwurzelkerbe. Im Vergleich zur FAT 71 nach IIW liegen alle Versuchsergebnisse auf der konservativen Seite.

Die Ergebnisse der Stumpfnähte mit DY-Naht und unverschweißtem Wurzelspalt sind in Abbildung 47 und Abbildung 48 gezeigt. Die Proben mit konventionellem Schweißgut zeigten Versagen mehrheitlich vom Nahtübergang aber auch von der unverschweißten Nahtwurzel. Die LTT-geschweißten Proben zeigten ausnahmslos Nahtwurzelversagen. Die Schwingfestigkeit bei 2 Millionen Lastwechseln beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 158 \text{ MPa}$ (Nahtübergangsversagen). Die Schwingfestigkeit der LTT-geschweißten Verbindungen beträgt etwa $\Delta\sigma = 90 \text{ MPa}$. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden der Versuchsreihen ist mit $k = 5$ und $k = 3,3$ im konventionell geschweißten Zustand flacher. Die FAT 36 (Nahtwurzelversagen) bewertet die Ergeb-

nisse LTT-geschweißter Verbindungen konservativ. IIW FAT 90 (Nahtübergangsversagen) ist aufgrund der großen Streuung der Versuchsdaten konventionell geschweißter Stumpfnähte im oberen Zeitfestigkeitsbereich teilweise nicht konservativ.

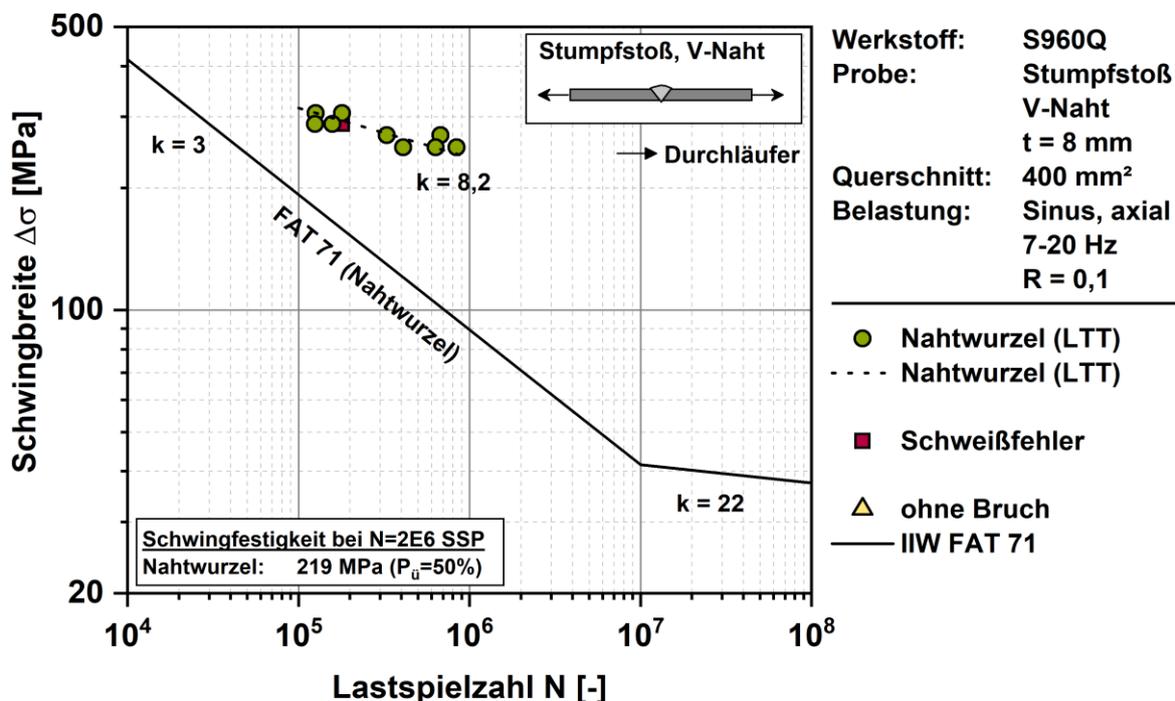


Abbildung 45 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S960Q

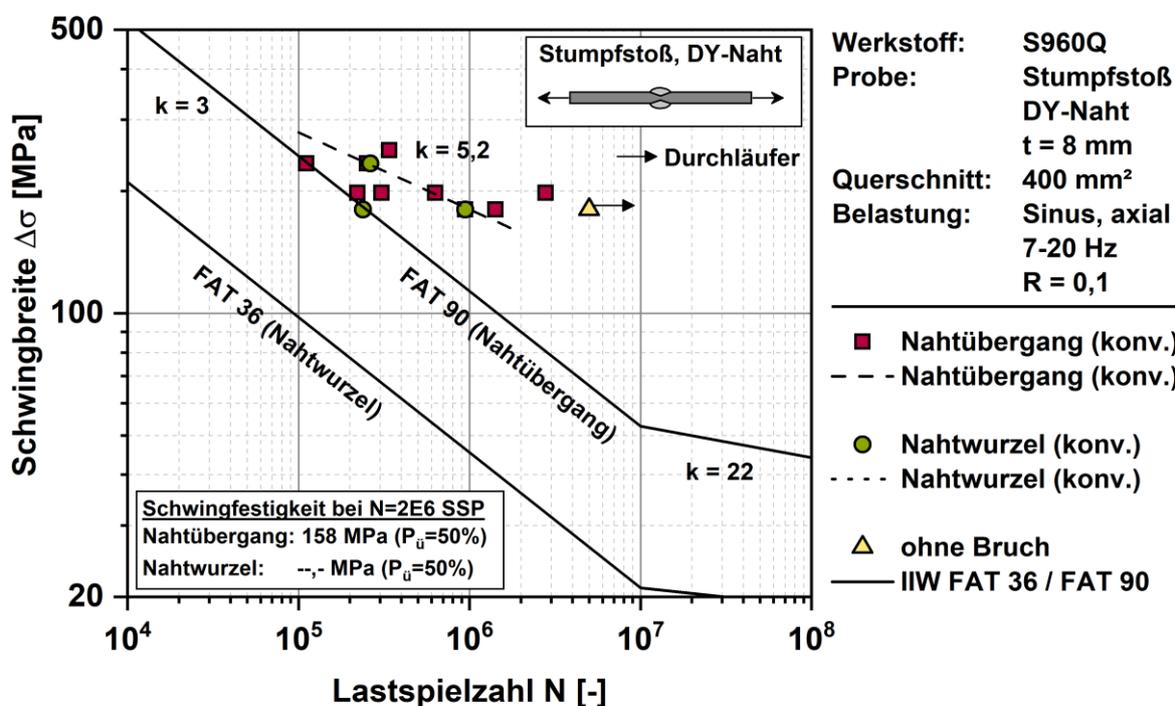


Abbildung 46 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Stumpfnähten (DY-Naht) aus S960Q

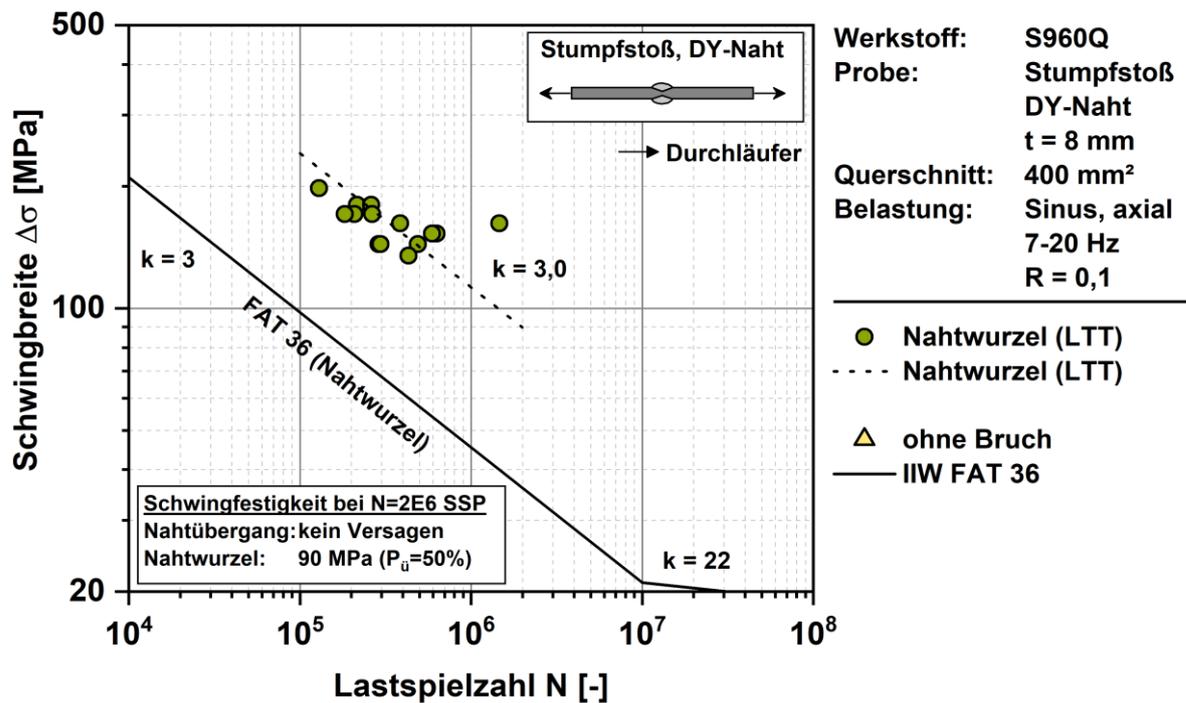


Abbildung 47 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (DY-Naht) aus S960Q

6.3.2 Kreuzstöße aus S960Q Cruciform joints made from S960Q

Die Schwingfestigkeitsergebnisse an Kreuzstößen mit HV-Naht sind in Abbildung 48 und Abbildung 49 gezeigt. Der Anrissort des Schwingrisses lag einheitlich an der Nahtwurzelkerbe. Die Schwingfestigkeit beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 140$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50\%$). LTT-geschweißte Kreuzstöße zeigen einen geringeren Wert $\Delta\sigma = 87$ MPa. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden ist im Schweißzustand mit etwa $k = 6$ flacher als bei LTT-geschweißten Verbindungen mit etwa $k = 3$. Die erhöhte Schwingfestigkeit der konventionell geschweißten Verbindungen ist aufgrund der flachen Neigung nur im Bereich hoher Lastwechselzahlen wirksam. Im Vergleich zur FAT 71 nach IIW liegen die Versuchsergebnisse auf der konservativen Seite.

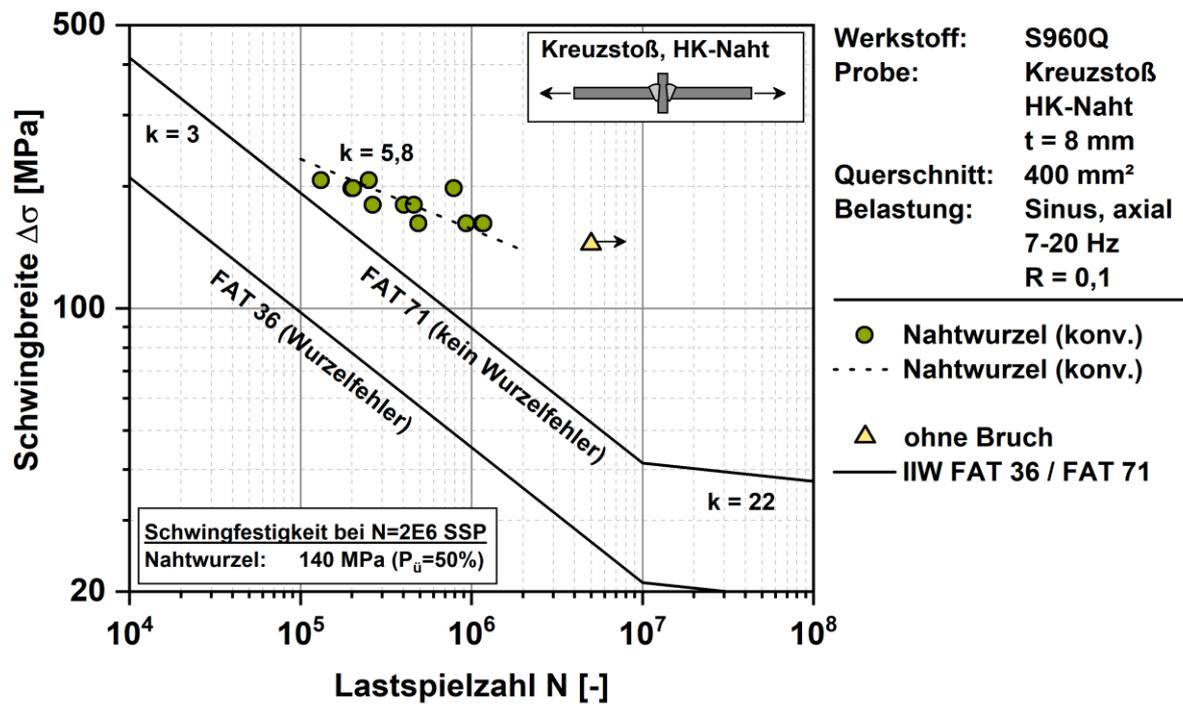


Abbildung 48 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Kreuzstößen aus S960Q

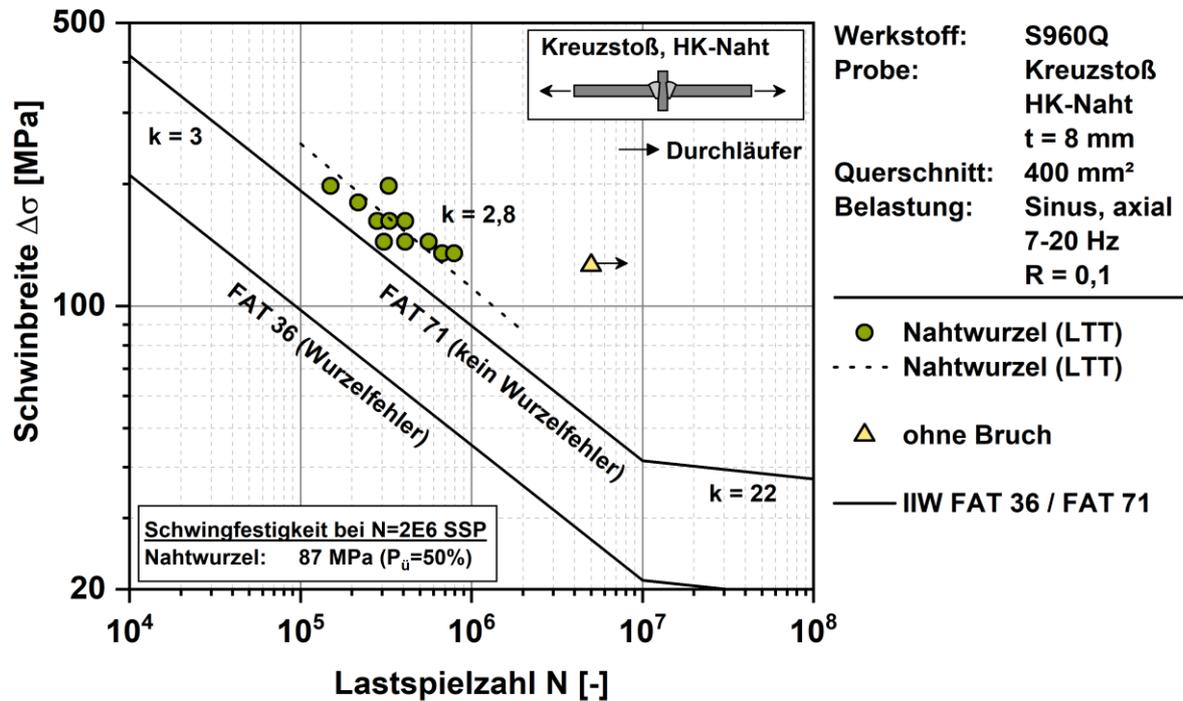


Abbildung 49 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Kreuzstößen aus S960Q

6.3.3 Überlappstöße aus S960Q Overlap joints made from S960Q

Einseitig geschweißte Überlappstöße aus S960Q wurden nur im LTT-geschweißten Zustand geprüft, Abbildung 50. Die Schwingfestigkeit beträgt hier etwa $\Delta\sigma = 30$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50$ %) bei einer Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden von etwa $k = 3$. Der Schwingriss ging bei konventionell geschweißten Verbindungen sowohl von der Nahtwurzel- als auch der Nahtübergangskerbe aus. LTT-geschweißte Verbindungen versagten ausschließlich ausgehend vom Nahtübergang.

Ergebnisse beidseitig geschweißter Überlappstöße sind in Abbildung 51 und Abbildung 52 dargestellt. Der Rissausgangsort lag einheitlich am Nahtübergang. Die Schwingfestigkeit beträgt im konventionell geschweißten Zustand etwa $\Delta\sigma = 54$ MPa. LTT-geschweißte Kreuzstöße zeigen einen höheren Wert i.H.v. $\Delta\sigma = 124$ MPa. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden konventionell geschweißter Verbindungen ist etwas flacher, sie beträgt im hier etwa $k = 4$ bzw. bei LTT-geschweißten Verbindungen etwa $k = 6$.

Die FAT 36 nach IIW beschreibt die Versuchsergebnisse der einlagigen Überlappstöße nicht konservativ. Gleiches gilt für FAT 63 nach IIW im Fall beidseitiger Ausführung mit konventionellem Zusatzwerkstoff und der Ausführung mit LTT-Zusatzwerkstoff im Bereich niedriger Lastwechselzahlen ($N < 200.000$). Dies kann, wie beim S355J2+N, mit der einschnittigen Ausführung des Überlappstoßes erklärt werden, da die IIW Bemessungswöhlerlinie für eine zweischnittige Verbindung gültig ist. Eine Bewertung unter Berücksichtigung der Außermittigkeit findet mit dem Kerbspannungskonzept statt (Abschnitt 6.5).

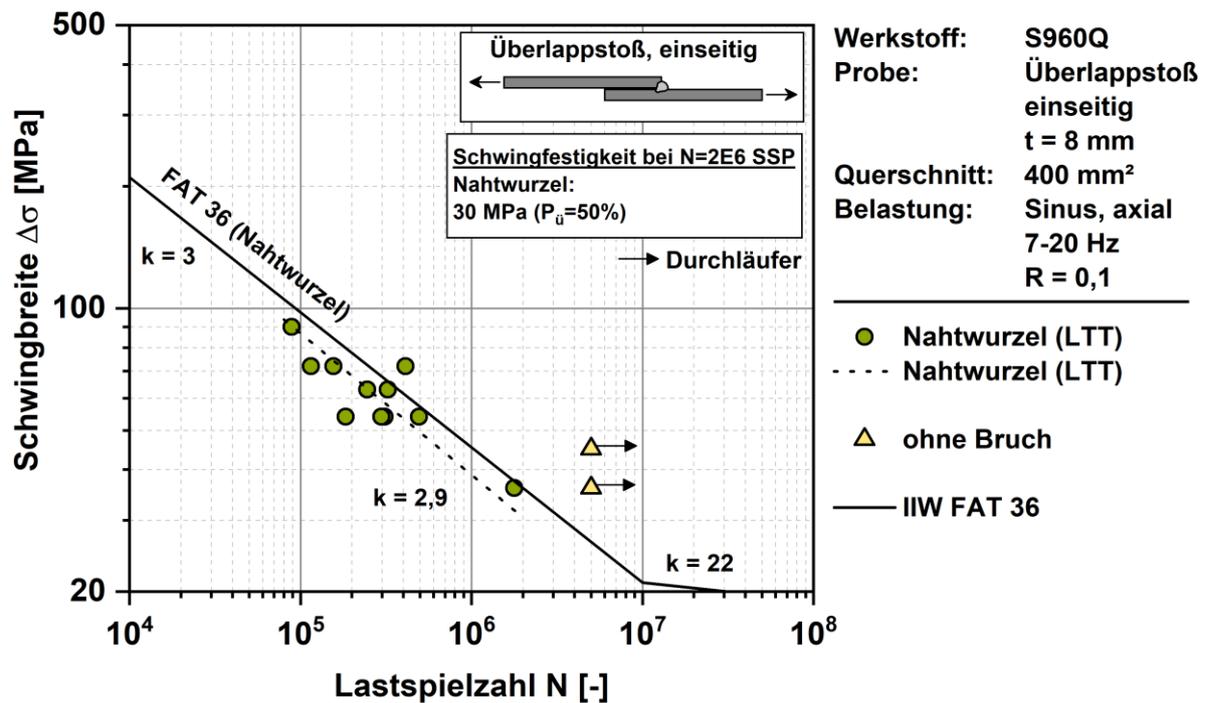


Abbildung 50 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an einseitig LTT-geschweißten Überlappstößen aus S960Q

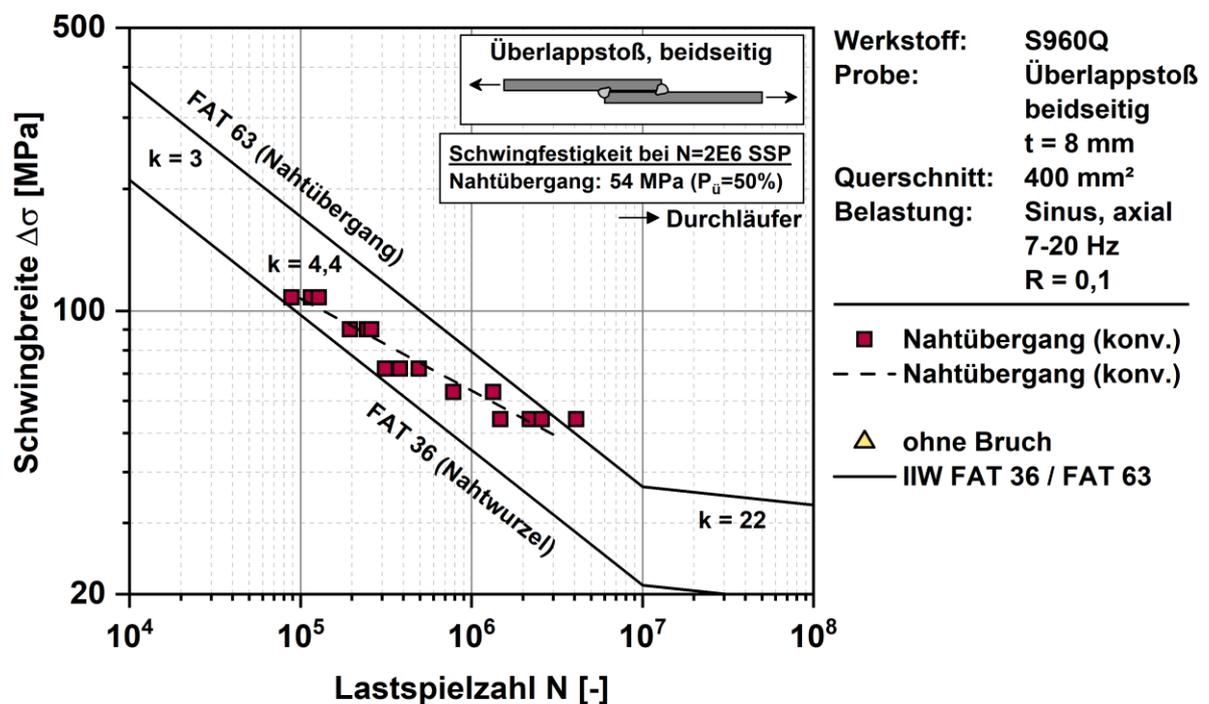


Abbildung 51 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an beidseitig konventionell geschweißten Überlappstößen aus S960Q

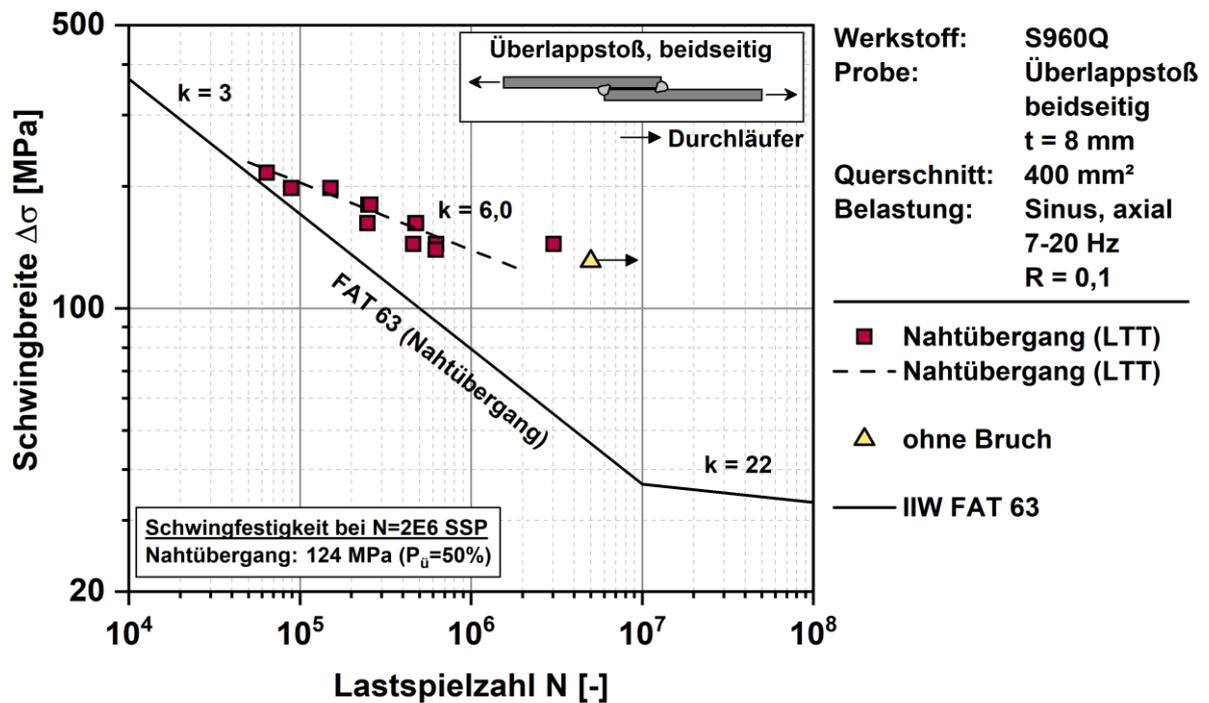


Abbildung 52 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an beidseitig LTT-geschweißten Überlappstößen aus S960Q

6.3.4 Längssteifen aus S960Q Longitudinal stiffener made from S960Q

Die Längssteife aus S960Q wurde nur mit zusätzlicher LTT-Schweißlage im Bereich der Stirnseite geprüft, Abbildung 53. Die Schwingfestigkeit beträgt hierbei etwa $\Delta\sigma = 202$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (extrapoliert). Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden beträgt etwa $k = 8$.

Im Vergleich zur FAT 63 nach IIW liegen die Versuchsergebnisse auf der konservativen Seite.

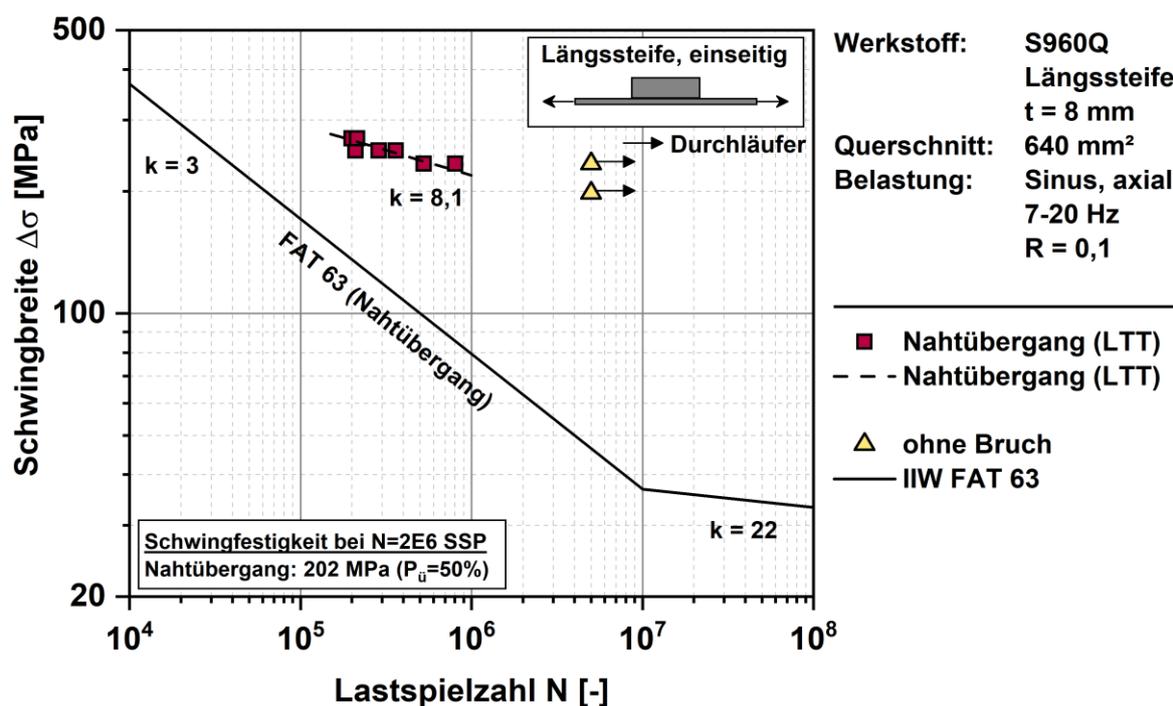


Abbildung 53 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an konventionell geschweißten Längssteifen mit zusätzlicher LTT-Lage im Bereich der Stirnseite aus S960Q

6.4 Schwingversuche an LTT-Proben mit Nachbehandlung Fatigue testing of LTT-welds with post weld treatments

In Ergänzung zu Untersuchungen der Schwingfestigkeitsverbesserung mittels LTT-Zusatzwerkstoff, wurden LTT-geschweißte Stumpfnähte (V-Naht) schweißnahtnachbehandelt. Alle vier Schweißnahtkerben an Deck- und Wurzelseite wurden dafür mittels hochfrequentem Hämmerverfahren (HFMI, Pit-Verfahren) behandelt bzw. mittels WIG-Schweißbrenner ohne Verwendung von Zusatzwerkstoff umgeschmolzen.

6.4.1 Stumpfstöße aus S355J2+N Butt welds made from S355J2+N

Die Schwingfestigkeitsergebnisse an Stumpfstößen mit V-Naht sind in Abbildung 54 und Abbildung 55 gezeigt. Die Schwingfestigkeit der zusätzlich HFMI behandelten Stumpfnähte beträgt etwa $\Delta\sigma = 274$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50\%$). Das WIG-Umschmelzen führt zu einer vergleichbaren Schwingfestigkeit von $\Delta\sigma = 280$ MPa. Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden beider Versuchsreihen ist sehr flach und beträgt etwa $k = 13$ bis 14 . Der Anrissort des Schwingrisses lag an der Nahtwurzelseite, vereinzelt trat Versagen im Grundwerkstoff auf. Im Vergleich zur FAT 90 (Nahtübergangsversagen ohne Schweißnahtnachbehandlung) FAT 71 nach IIW (Nahtwurzelseiteversagen ohne Schweißnahtnachbehandlung) liegen alle Versuchsergebnisse auf der konservativen Seite.

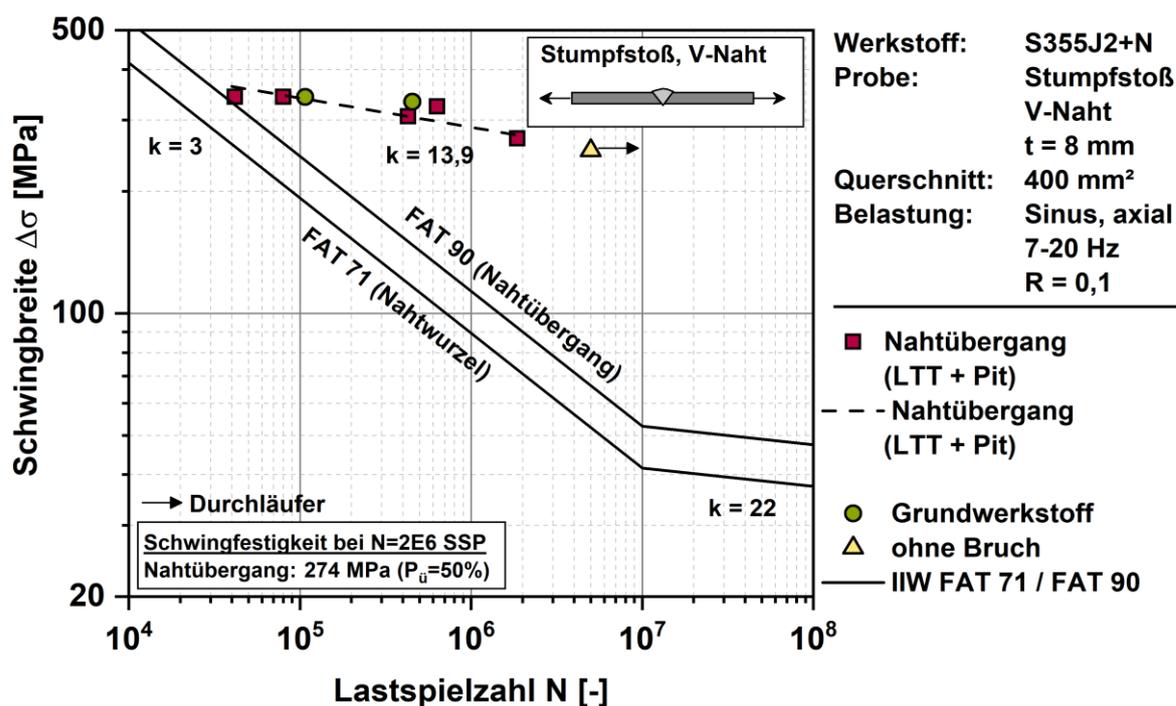


Abbildung 54 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnahten (V-Naht) aus S355J2+N mit zusätzlicher Pit Schweißnahtnachbehandlung (HFMI)

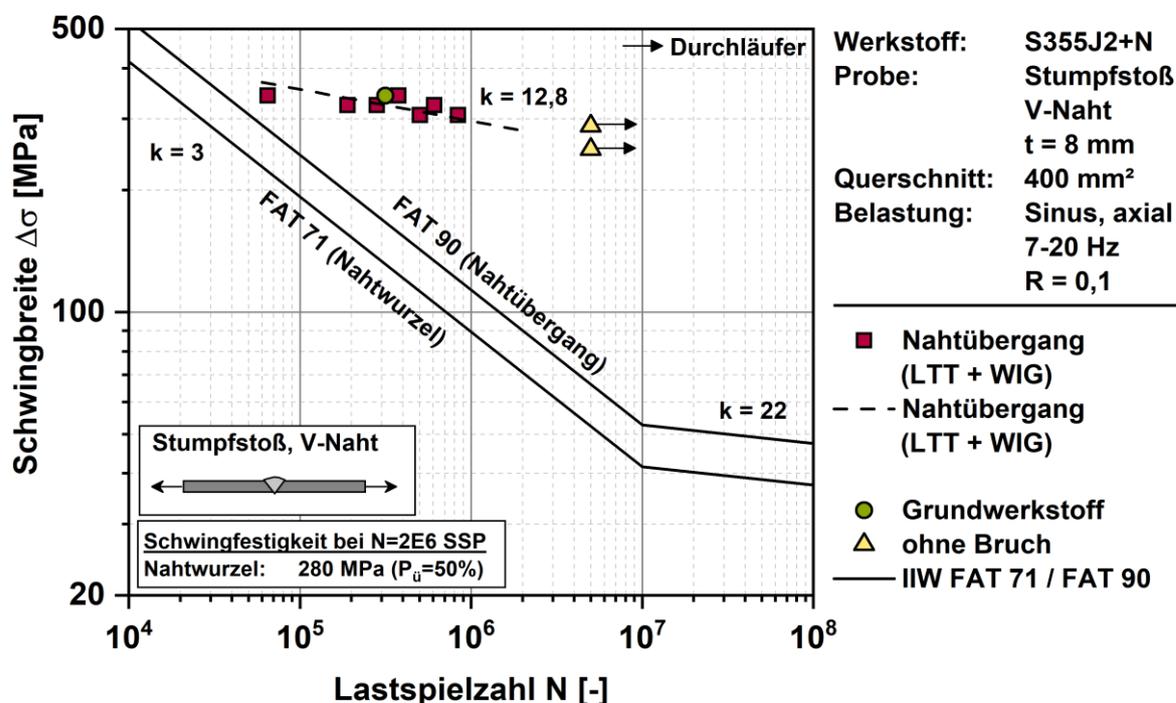


Abbildung 55 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnahten (V-Naht) aus S355J2+N mit zusätzlicher WIG Schweißnahtnachbehandlung

6.4.2 Stumpfstöße aus S960Q Butt welds made from S960Q

Die Schwingfestigkeitsergebnisse an hochfesten Stumpfstößen mit V-Naht sind in Abbildung 56 und Abbildung 57 gezeigt. Die Schwingfestigkeit der zusätzlich HFMI behandelten Stumpfnähte beträgt etwa $\Delta\sigma = 326$ MPa bei 2 Millionen Lastwechseln (Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 50\%$). WIG-Nachbehandlung führte zu einer geringeren Schwingfestigkeit von $\Delta\sigma = 170$ MPa (extrapoliert). Die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden der HFMI-behandelten Versuchsreihe beträgt etwa $k = 11$, wohingegen die der WIG-umgeschmolzenen Versuchsreihe $k = 3$ beträgt. Durchläufer treten bei der WIG-Versuchsreihe jedoch schon bei hohen Spannungsamplituden auf, der Abknickpunkt der Wöhlerlinie deutet sich ab etwa 800.000 Lastwechseln an. Der Anrissort des Schwingrisses lag im Fall der HFMI-Versuche an der Nahtwurzelkerbe während WIG-nachbehandelte Probe mehrheitlich von der Decklage aus versagten.

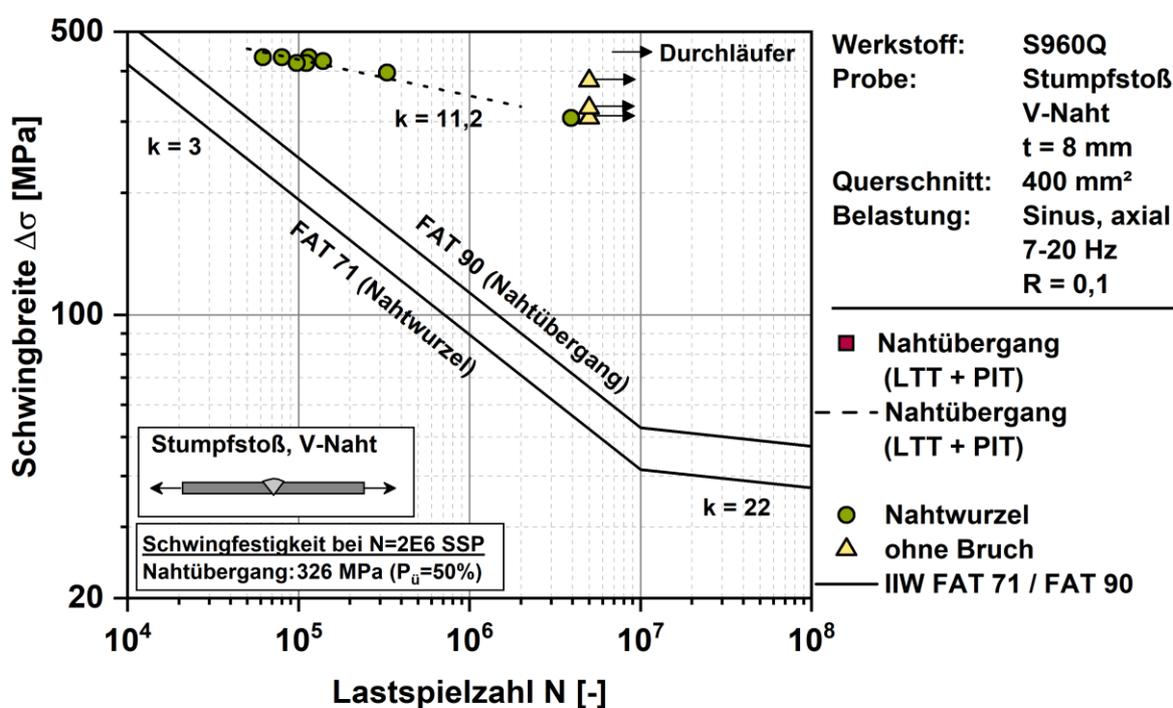


Abbildung 56 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S960Q mit zusätzlicher Pit Schweißnahtnachbehandlung (HFMI)

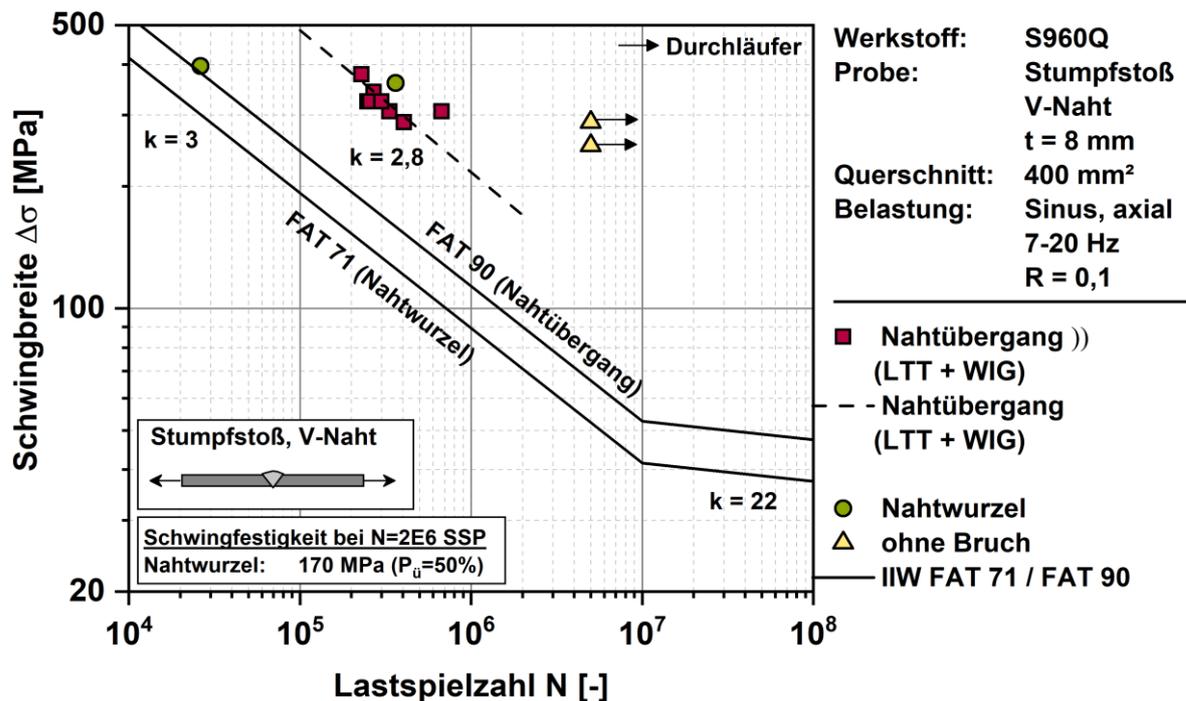


Abbildung 57 Ergebnisse des Wöhlerversuchs an LTT-geschweißten Stumpfnähten (V-Naht) aus S960Q mit zusätzlicher WIG Schweißnahtnachbehandlung

6.5 Kerbspannungsanalysen Überlappstoß Notch stress analysis of overlap joints

Die Bewertung der Schwingfestigkeitsergebnisse von Überlappstößen nach dem Nennspannungskonzept berücksichtigte nicht die Außermittigkeit infolge einseitiger Ausführung. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte deshalb mithilfe des Kerbspannungskonzeptes.

Die Kerbspannungsberechnung erfolgte unter Verwendung des 1 mm Kerbradius an Nahtübergang und Nahtwurzel (Schlüssellochkerbe). Die Kehlnaht wurde mit einem Flankenwinkel von 45 ° abgebildet, wobei die Schenkellänge 6 mm betrug. Abbildung 58 zeigt berechnete Kerbspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma$ bei 2 Millionen Lastwechseln der Überlappstöße aus S355J2+N (linkes Teilbild) und S960Q (rechts). Die Ergebnisse wurden anhand der Vorgabe eines einheitlichen Streubandes $T_s = 1:1,5$ auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5 % umgerechnet. Als Vergleichswert ist FAT 225 nach IIW dargestellt. Unter Berücksichtigung der Außermittigkeit werden die Schwingfestigkeitsergebnisse mit dem Kerbspannungskonzept konservativ bewertet. Die Kerbspannungsschwingbreiten konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen sind im Fall der einseitig geschweißten Überlappstöße aus S355J2+N vergleichbar. Eine Steigerung der Schwingfestigkeit durch die Verwendung des LTT-Zusatzes ergibt sich bei beidseitiger Ausführung für beide Werkstoffe. Das Versagen geht bei einseitiger Ausführung von der Nahtwurzel aus, bei beidseitiger Ausführung vom Nahtübergang.

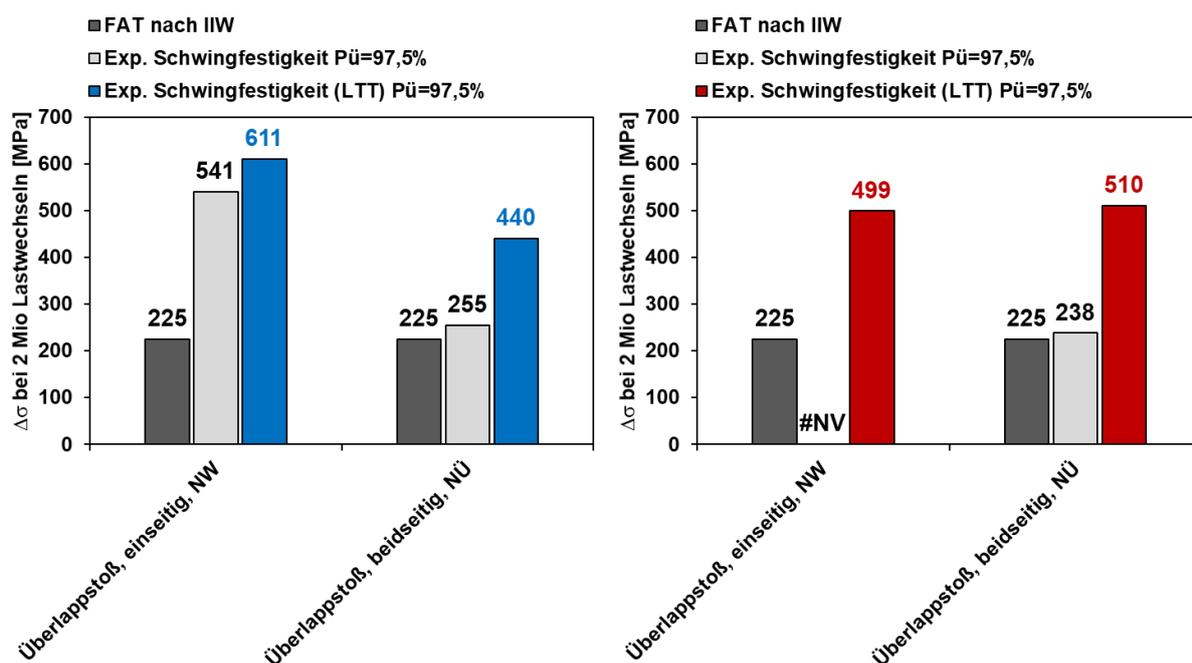


Abbildung 58 Kerbspannungsbewertung der Überlappstöße aus S355J2+N (links) und S960Q (rechts). NW: Nahtwurzelsversagen, NÜ: Nahtübergangsversagen

6.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Eine vergleichende Darstellung der Schwingfestigkeit der untersuchten Stoßarten, Grund- und Zusatzwerkstoffe findet sich in Abbildung 59 und Abbildung 60. Dargestellt sind die experimentell ermittelten Schwingfestigkeiten konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen im Nennspannungskonzept. Überlappstöße sind hier aufgrund der zuvor angesprochenen Problematik nicht enthalten. Verglichen werden die Schwingfestigkeitskennwerte bei 2 Millionen Lastwechseln, umgerechnet auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5 % unter Vorgabe eines einheitlichen Streubandes von $T_s = 1:1,5$. Ergänzend werden zugehörige FAT Klassen nach IIW gezeigt.

Die Daten sind entsprechend der ermittelten Stoßarten und Anrissorte (NÜ: Nahtübergang, NW: Nahtwurzel) unterschieden. Liegen für eine Kombination von Stoßart und Anrissort keine Versuchsdaten vor, ist dies im Diagramm mit „#NV“ („no value“) gekennzeichnet.

Insgesamt ergibt sich beim Vergleich konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen bei beiden Werkstoffen ein diverses Bild. Eine Steigerung der Schwingfestigkeit durch Einsatz des LTT-Werkstoffes ist bei insgesamt vier Versuchsreihen beobachtet worden:

- S355J2+N Stumpfstoß mit V-Naht,
- S960Q Stumpfstoß mit V-Naht,
- S355J2+N Längssteife,
- S960Q Längssteife.

Eine Verringerung bzw. keine signifikante Steigerung der Schwingfestigkeit ergab sich bei diesen Versuchen:

- S355J2+N Stumpfstoß mit DY-Naht (Verschiebung des Anrisses von der Übergangskerbe einheitlich an die Nahtwurzel),
- S960Q Stumpfstoß mit DY-Naht (Verschiebung des Anrisses von der Übergangskerbe einheitlich an die Nahtwurzel),
- S355J2+N Kreuzstoß,
- S960Q Kreuzstoß.

Stumpfstöße als V-Naht und Längssteifen wiesen einen stärkeren Anstieg der Schwingfestigkeit bei hochfestem Grundwerkstoff S960Q auf. Dieser positive Effekt der hochfesten Werkstoffe wurde ebenfalls an Überlappstößen beobachtet, vergleiche Abbildung 58.

Eine zusätzliche Schweißnahtnachbehandlung führte zu einer deutlich ausgeprägten Steigerung der Schwingfestigkeit, Abbildung 61. Die Erhöhung durch HFMI-Behandlung ist beim Werkstoff S960Q höher. Dies ist im Einklang mit IIW Empfehlungen zur Bemessung HFMI-behandelter Schweißnähte. Das WIG-Wiederaufschmelzen hat beim S355J2+N einen höheren Effekt als beim S960Q. Beim S355J2+N ist der Gewinn an Schwingfestigkeit durch die beiden Verfahren vergleichbar. Beim hochfesten Werkstoff ist die HFMI-Behandlung erfolgreicher.

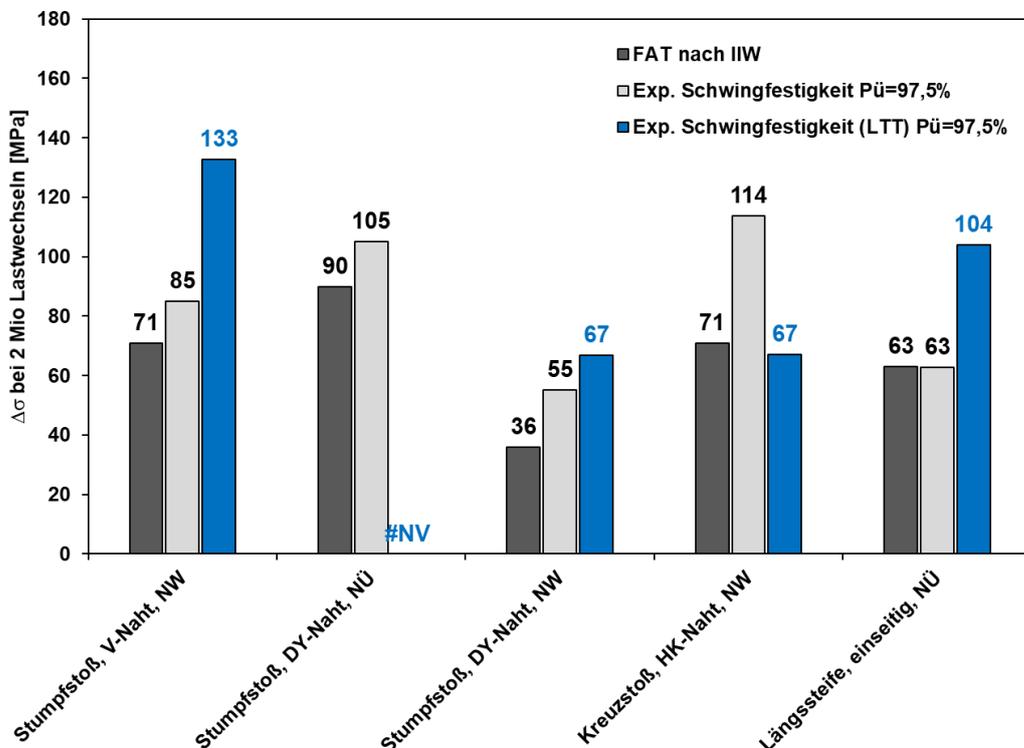


Abbildung 59 Vergleichende Darstellung der Schwingfestigkeit $\Delta\sigma$ konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen aus S355J2+N bei 2 Millionen Lastwechseln

Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Fatigue testing

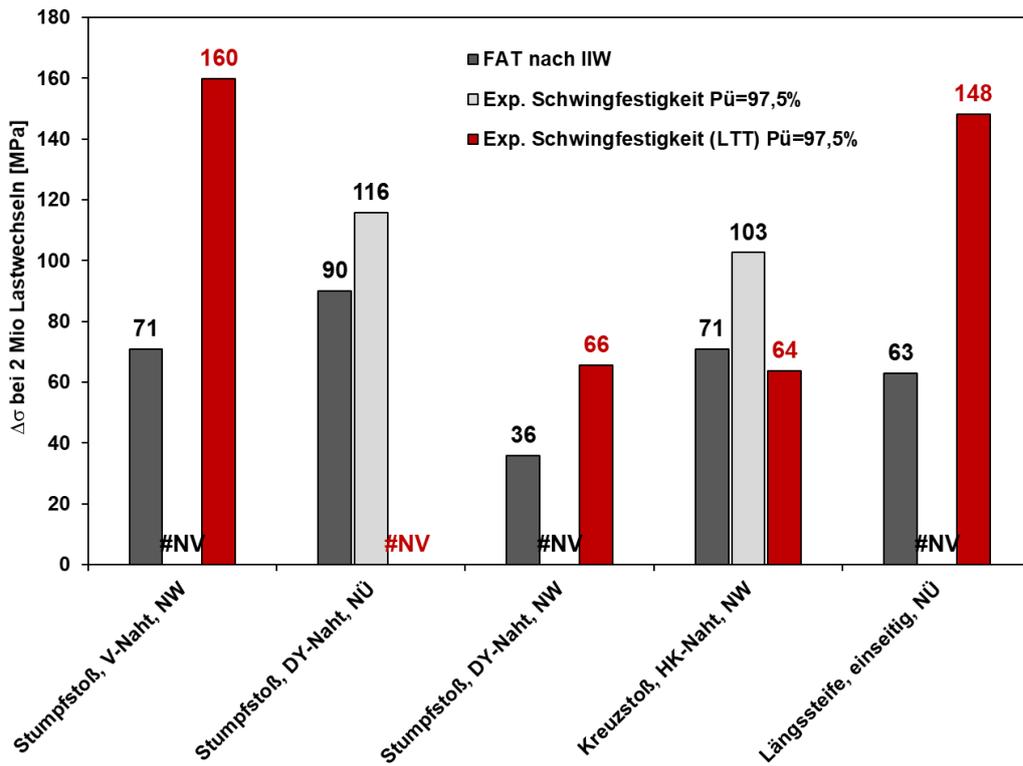


Abbildung 60 Vergleichende Darstellung der Schwingfestigkeit $\Delta\sigma$ konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen aus S960Q bei 2 Millionen Lastwechseln

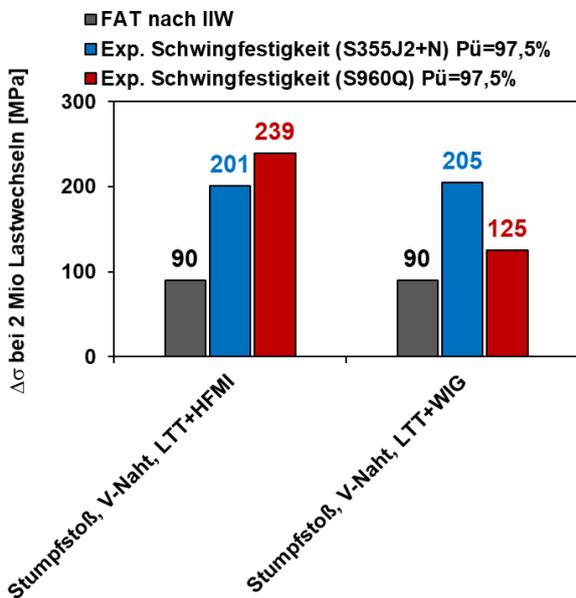


Abbildung 61 Vergleichende Darstellung der Schwingfestigkeit $\Delta\sigma$ LTT-geschweißter Verbindungen aus S355J2+N und S960Q bei 2 Millionen Lastwechseln mit Schweißnahtnachbehandlung HFMI (links) und WIG (rechts)

7 Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben Determination of residual stresses and residual stress relaxation

Kurzfassung

Die Eigenspannungen wurden zerstörungsfrei mittels Röntgenbeugung an allen Schwingversuchsreihen bestimmt. Ziel der Untersuchungen war die Charakterisierung des Ausgangszustands der Eigenspannungen sowie deren Veränderung unter mechanischer Beanspruchung. Anhand der Messungen kann der Eigenspannungszustand konventionell und LTT-geschweißter Verbindungen verglichen werden. Dies erlaubt Rückschlüsse auf mögliche Eigenspannungseffekte im Schwingversuch. Es zeigte sich, dass die Verwendung des LTT-Zusatzwerkstoffes im nahtnahen Bereich kaum Einfluss auf den Eigenspannungszustand nahm. Insbesondere bei den linienförmigen Verbindungen mit geringer Schrumpfungshinderung quer zur Naht unterscheiden sich die beiden Schweißvarianten kaum. Bei der bauteilähnlichen Längssteife mit selbsteinspannender Wirkung werden die Eigenspannungen in Beanspruchungsrichtung am Nahtübergang dagegen merklich durch Verwendung des LTT-Zusatzes herabgesetzt.

Abstract

Residual stresses of all fatigue test series were determined by means of X-ray diffraction. The objective of these studies were the characterization of initial residual stress conditions as well as the determination of cyclic residual stress behavior. This allows the comparison of residual stresses conventional and LTT-welded specimens and its influence on fatigue test results. The use of LTT-filler metals had only minor influence on the residual stress conditions in the near vicinity of the weld. Especially longitudinal shaped welds with minor shrinkage constraints showed little differences between the two filler metals used. Contrary, the self-constraining shape of longitudinal stiffener affected the residual stresses by use of LTT-filler metals significantly.

7.1 Methode Method

Die röntgenographische Bestimmung der Ausgangseigenspannungen erfolgte an den untersuchten Schwingproben im Ausgangszustand sowie nach einsinniger Überlast im Zug- / Druckversuch. Desweiteren wurde möglicher Eigenspannungsabbau im Schwingversuch durch dekadische Wiederholungsmessungen untersucht.

Die Oberflächeneigenspannungen wurden aus röntgenographisch bestimmten Interferenzlinien mit Hilfe des $\sin^2\psi$ -Verfahrens ermittelt. Unter Verwendung der Cr-K α -Strahlung wurden Interferenzlinien der {211}-Ebene des Ferrits bzw. des Martensits unter 11

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

Ψ -Winkeln ($0^\circ, 13^\circ, 18^\circ, 24^\circ, 27^\circ, 30^\circ, 33^\circ, 36^\circ, 39^\circ, 42^\circ$ und 45°) in einem 2θ -Winkelbereich von $150^\circ - 162^\circ$ gemessen. Der Durchmesser des beleuchteten Messflecks (Kollimator) beträgt 2mm. Für die Auswertung der gemessenen Interferenzlinien wurde die Schwerelinienmethode angewandt. Die röntgenographische Elastizitätskonstante, die für die Eigenspannungsberechnung eingesetzt wird, beträgt $1/2 S_2 = -6.08 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ ($E = 206000 \text{ N/mm}^2$ und $\nu = 0.28$).

Die Eigenspannungsmessungen wurden an den Stumpf- sowie an den Kreuzstößen jeweils an der Ober- und an der Unterseite (Deck- bzw. Wurzelseite) ermittelt. An den Überlappstößen (ein- und beidseitig) wurden Eigenspannungen ausgehend vom Nahtübergang in den Grundwerkstoff gemessen, Abbildung 62. Quereigenspannungen entsprechen an diesen linienförmigen Verbindungen der Komponente in Belastungsrichtung (quer zur Schweißrichtung). An Längssteifen orientiert sich die Bezeichnung an der Schweißrichtung der Kehlnähte, Eigenspannungen in Beanspruchungsrichtung entsprechen den Längseigenspannungen, Abbildung 63. Die Eigenspannungsmessungen an den Längssteifen erfolgten stirnseitig entlang einer Messspur vom Nahtübergang hinweg in das Grundmaterial.

Von jeder Probenvariante wurden drei bis fünf Proben gemessen. Die Eigenspannungen werden als arithmetisches Mittel dargestellt, das Streuband zeigt den jeweilig höchsten und niedrigsten ermittelten Werte an der jeweiligen Messposition an.

Druckeigenspannungen im Grundwerkstoff sind auf das Reinigen der Proben mittels Strahlen zurückzuführen. Die Betrachtung beschränkt der Eigenspannungen beschränkt sich folglich auf den nahtnahen Bereich.

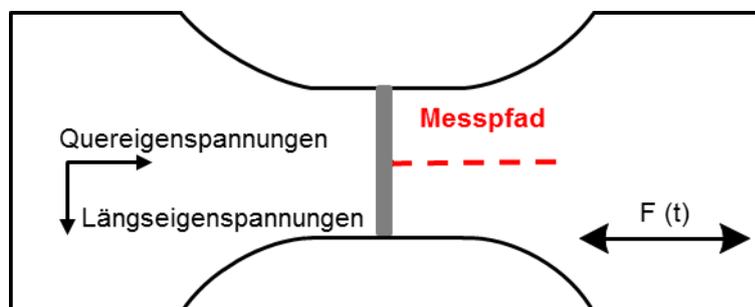


Abbildung 62 Messpfad für die röntgenografische Eigenspannungsbestimmung und Definition der Eigenspannungsrichtung (Stumpf- und Kreuzstoß, sowie Überlappstoß), Draufsicht Stumpfstoß

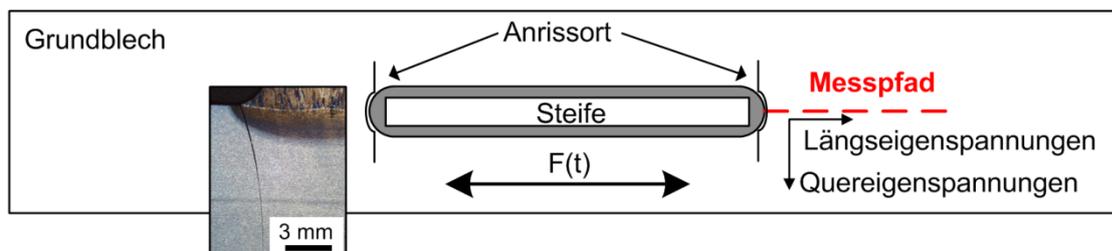


Abbildung 63 Messpfad für die röntgenografische Eigenspannungsbestimmung und Definition der Eigenspannungsrichtung, Draufsicht Längssteife

7.2 Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an konventionell geschweißten Proben aus S355J2+N

Residual stress determination in conventionally welded specimens by means of X-ray diffraction

7.2.1 Stumpfstöße aus S355J2+N Butt welds made from S355J2+N

Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen die Ergebnisse der röntgenographischen Eigenspannungsmessungen an den Deck- und an den Wurzellagen konventionell geschweißter Stumpfstöße mit V-Naht. Es wird die Spannungskomponente längs und quer zur Schweißnaht gezeigt. An der Decklage wurden die höchsten Zugeigenspannungen in Längsrichtung in der WEZ in einer Höhe von 200 MPa ermittelt. In der Schweißnaht lagen Längseigenspannungen in einem Bereich von -150 MPa bis +100 MPa vor. In der Querrichtung wurden die maximalen Zugeigenspannungen im Nahtübergang gemessen. Der Mittelwert der Eigenspannungen liegt zwischen 100 MPa bis 150 MPa. Die maximalen Zugeigenspannungen in Längsrichtung an der Nahtwurzel in Höhe von 150 MPa wurden in 10 mm Abstand von der Mitte der Schweißnaht ermittelt. Im Nahtübergang liegen Druckeigenspannungen von -150 MPa vor. Der Mittelwert der Quereigenspannungen aus drei Proben liegt ausschließlich im Druckbereich. Im Nahtübergang wurden Druckeigenspannungen von -150 MPa bis -100 MPa gemessen.

Die an der Ober- und Unterseite ermittelten Eigenspannungsverläufe des Stumpfstoßes mit DY-Nahtvorbereitung sind in Abbildung 66 und Abbildung 67 dargestellt. Die höchsten Längseigenspannungen i.H.v. 100 MPa liegen wie bei der V-Naht in 10 mm Abstand von der Schweißnahtmitte. In Querrichtung wurde über die gesamte Messstrecke Druckeigenspannungen gemessen. Am Nahtübergang weisen die Druckeigenspannungen einen Betrag von -200 MPa (Oberseite-Decklage 1) -150 MPa (Unterseite-Decklage 2) auf.

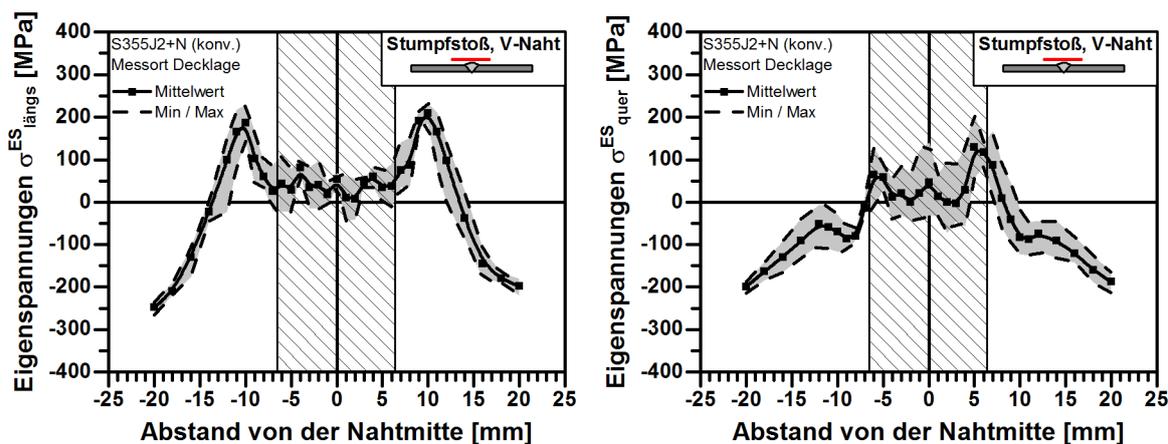


Abbildung 64 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N konv. V-Naht, Decklage

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

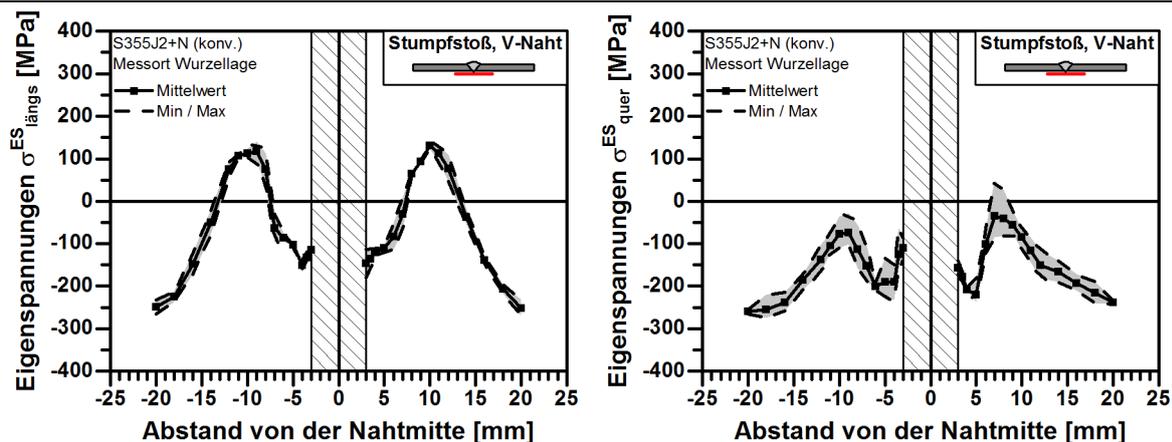


Abbildung 65 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N konv. V-Naht, Wurzellage

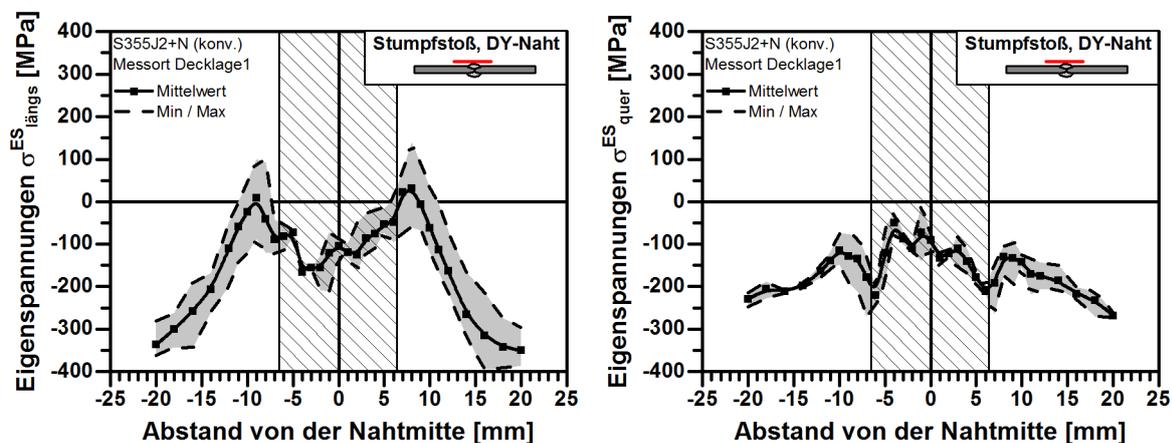


Abbildung 66 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N konv. DY-Naht, Decklage 1

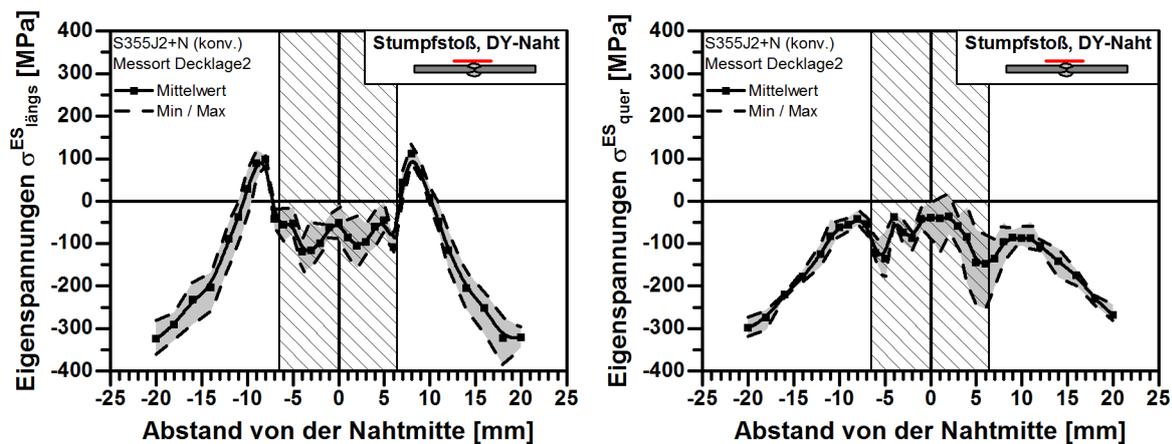


Abbildung 67 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N konv. DY-Naht, Decklage 2

7.2.2 Kreuzstöße aus S355J2+N Cruciform joints made from S355J2+N

Abbildung 68 bis Abbildung 71 zeigen die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen an Kreuzstößen mit HV-Nahtvorbereitung. Es wurden Längs- und Quereigenspannungen rechts und links der Quersteife an der Deck- und Wurzellage gemessen. Am Nahtübergang der Decklage sind die Eigenspannungen sowohl in der Längs- als auch in der Querrichtung nahe Null. Die Längseigenspannungen nahmen im weiteren Verlauf zu und sie erreichen ihr Maximum (ca. 200 MPa) bei 2 mm Entfernung vom Schweißnahtübergang. In der Querrichtung liegen die Eigenspannungen fast ausschließlich im Druckbereich.

Am Nahtübergang der Wurzellagen wurden in Längsrichtung Zugeigenspannungen i.H.v. ca. 75 MPa gemessen. Sie erreichen ein Maximum von 175 MPa bis 220 MPa in einem Abstand von 5-7 mm von der Schmelzlinie. Die Quereigenspannungen weisen am Nahtübergang Zugeigenspannungen von ca. 50 MPa auf.

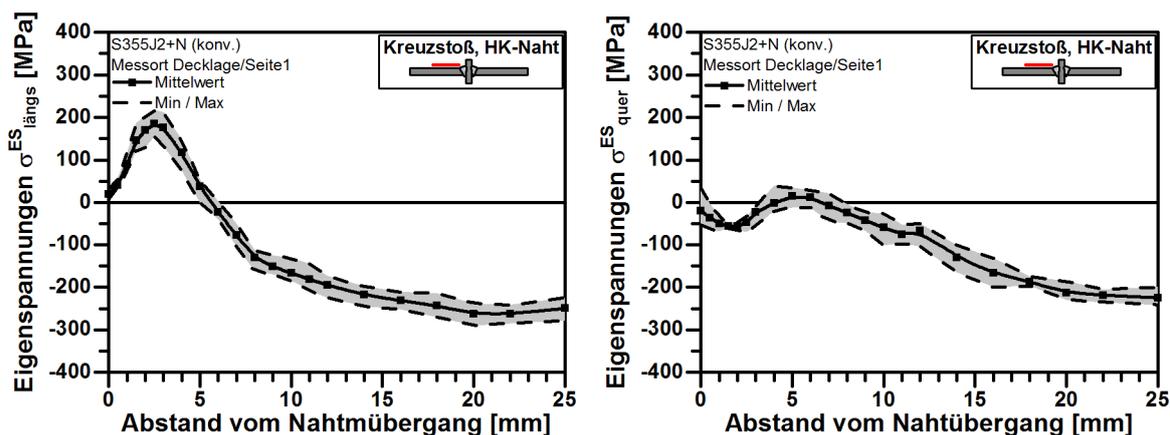


Abbildung 68 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N HK-Naht;

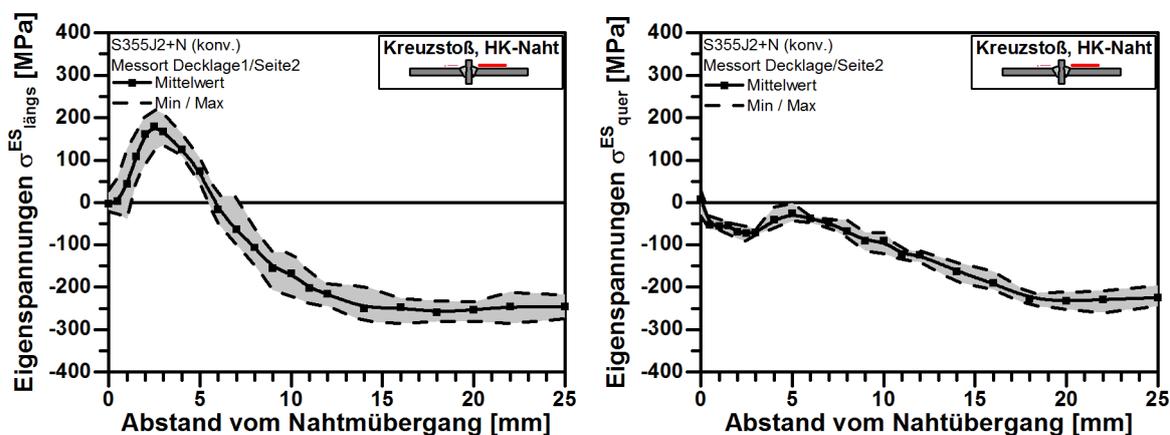


Abbildung 69 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N HK-Naht;

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

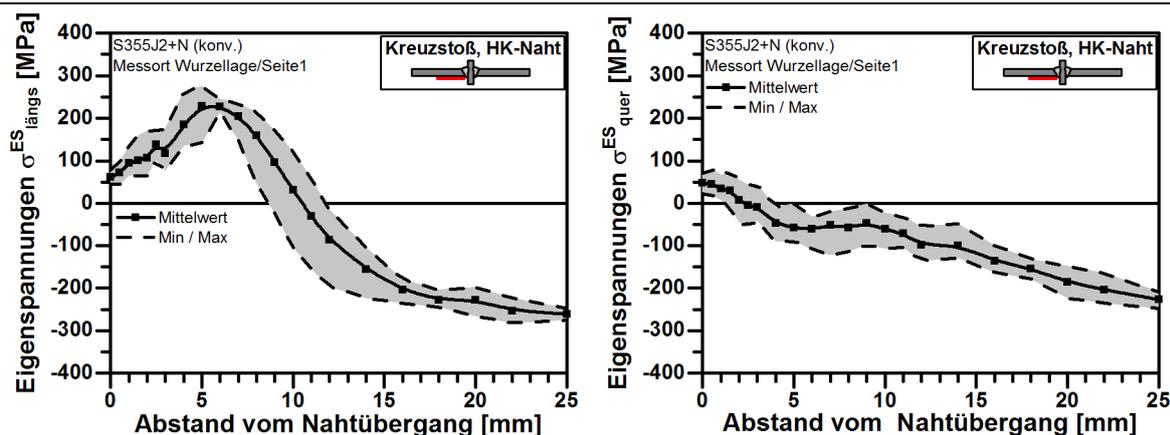


Abbildung 70 L\u00e4ngseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N HK-Naht;

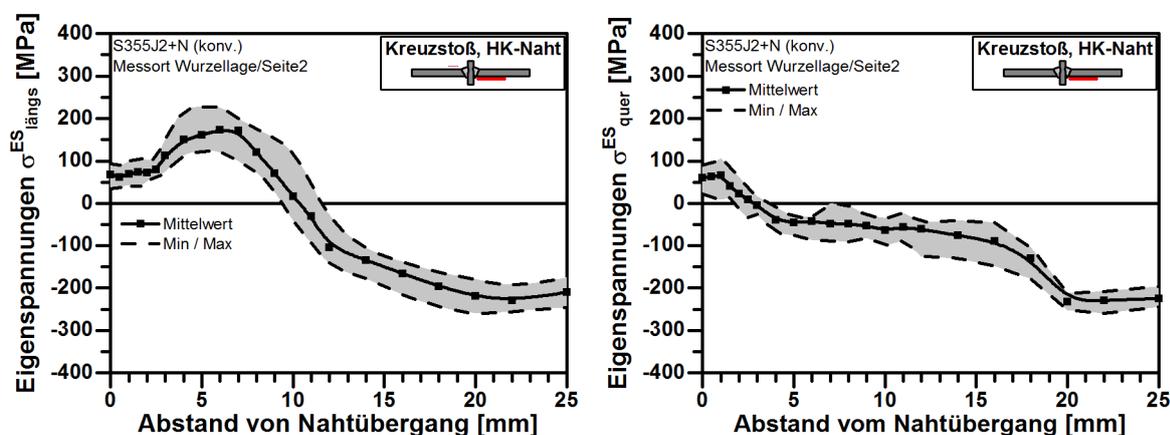


Abbildung 71 L\u00e4ngseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N HK-Naht;

7.2.3 \u00dcberlappsto\u00df aus S355J2+N Overlap joints made from S355J2+N

Die Eigenspannungsverl\u00e4ufe der einseitig und beidseitig geschwei\u00dften \u00dcberlappst\u00f6\u00dfe werden in Abbildung 72 bis Abbildung 74 dargestellt. Die L\u00e4ngseigenspannungen erreichen sowohl bei einseitig (Seite 1) als auch bei beidseitig geschwei\u00dften \u00dcberlappst\u00f6\u00dfen (Seite 1 und Seite 2) ihr Maximum in unmittelbarer N\u00e4he der Schmelzlinie. Sie weisen in einer Entfernung von ca. 2 mm einen Wert von ca. 250 MPa auf. Am Naht\u00fcbergang wurden in L\u00e4ngsrichtung Zugeigenspannungen von ca. 50 MPa (Mittelwert) gemessen.

In den Abbildungen sind rechts die jeweiligen Verl\u00e4ufe der Quereigenspannungen aufgezeichnet. In der N\u00e4he der Schmelzlinie wurden geringe Eigenspannungsbetr\u00e4ge gemessen. Der Mittelwert der Eigenspannungen liegt zwischen 0 und -20 MPa. Im Abstand von 2-3 mm steigen die Eigenspannungen auf ein Maximum von 50 MPa an. In weiterem Verlauf nehmen die Eigenspannungen ab. In einem Abstand von 5 mm von der Schmelzlinie in Richtung des Grundwerkstoffes werden Druckeigenspannungen gemessen, die bis auf einen Wert von -300 MPa ansteigen. Diese sind bedingt durch das Reinigungsstrahlen der Proben vor dem Schwei\u00dfen.

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

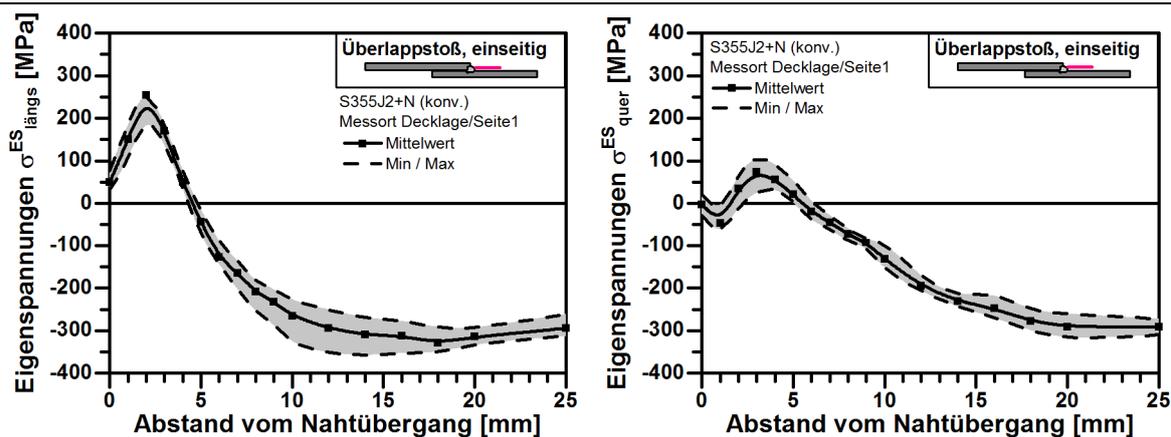


Abbildung 72 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Überlappstoß, einseitig Decklage/Seite1

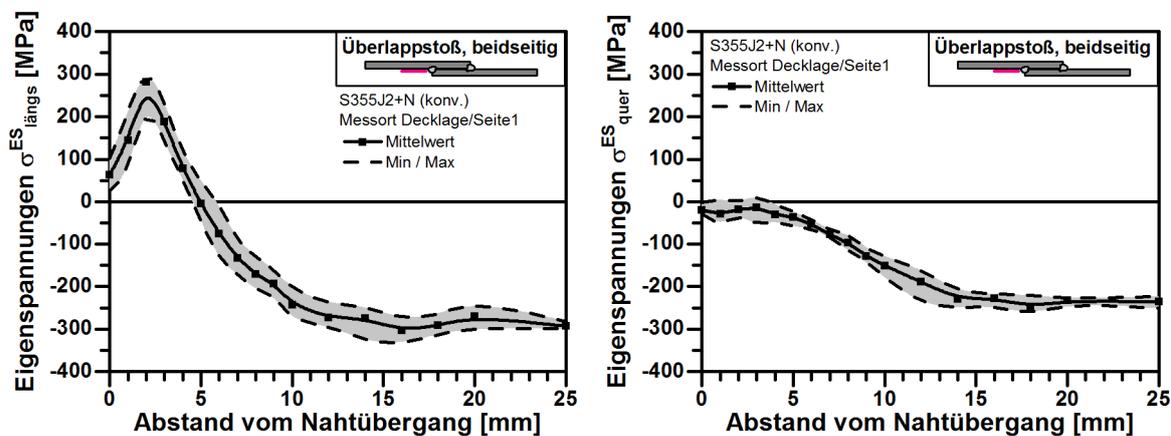


Abbildung 73 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Überlappstoß, beidseitig Decklage/Seite1

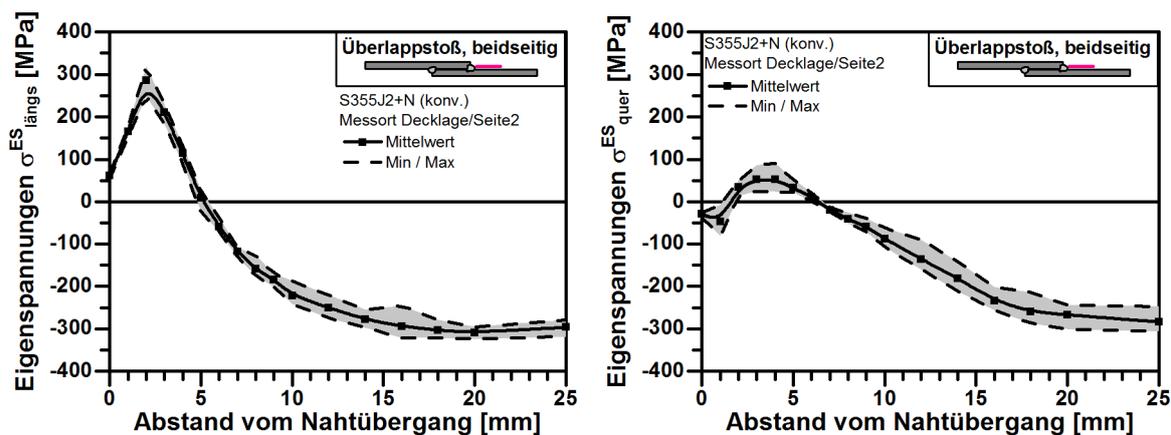


Abbildung 74 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Überlappstoß, beidseitig Decklage/Seite2

7.2.4 Längssteife aus S355J2+N

Longitudinal stiffener made from S355J2+N

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen an konventionell geschweißten Längssteifen aus S355J2+N sind Abbildung 75 und Abbildung 76 zu entnehmen. Die Eigenspannungen wurden links (Seite1) und rechts (Seite2) der Steife gemessen. Die Längseigenspannungen zeigen ihr Maximum direkt am Nahtübergang, sie betragen 200 MPa. Mit zunehmendem Abstand von der Schweißnaht fallen die Eigenspannungen ab, ab einem Abstand von ca. 2 mm vom Nahtübergang liegen nur Druckeigenspannungen vor. Die Quereigenspannungen (Teilbild rechts) haben am Nahtübergang im Mittel einen Wert von 50 MPa. Im Abstand von ca. 3 mm liegt das Maximum mit 400 MPa. Die Eigenspannungen gehen in einem Abstand von 15 mm zum Nahtübergang in Druckeigenspannungen über. Der gegenüberliegenden der Steife liegen am Nahtübergang Längseigenspannungen von 50 MPa vor. In einem Abstand von 1 mm wurden Druckeigenspannungen i.H.v. -300 MPa gemessen, die dann bis in den Grundwerkstoff auf gleichem Niveau verbleiben. Die Quereigenspannungen haben am Nahtübergang einen Wert von etwa 150 MPa. Das Maximum liegt in einem Abstand von 2 mm vom Nahtübergang und beträgt 350 MPa. Bis 12 mm vom Nahtübergang sind Zugeigenspannungen zu verzeichnen. Dann gehen die Quereigenspannungen in den Druckbereich über und erreichen im Grundwerkstoff einen Wert von -250 MPa.

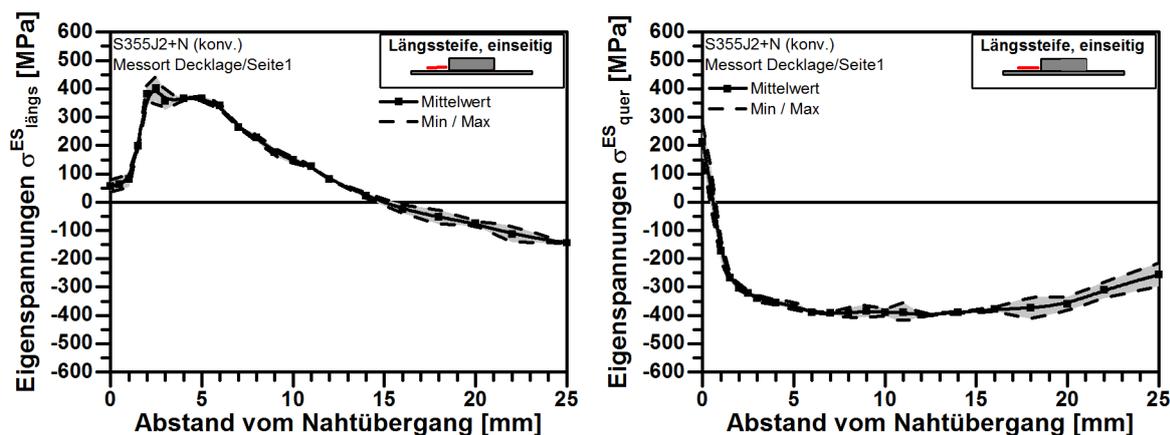


Abbildung 75 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Längssteife, Decklage/Seite1

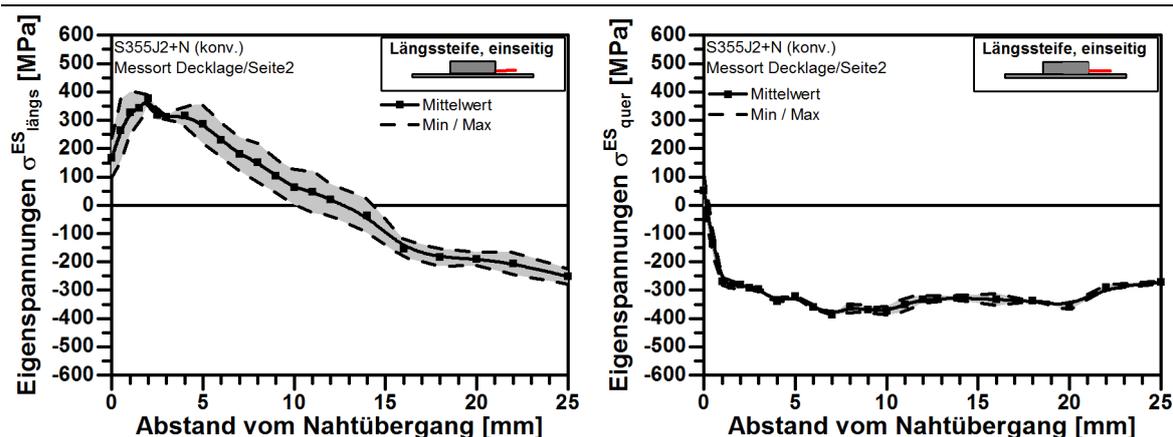


Abbildung 76 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N Längssteife, Decklage/Seite2

7.3 Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an konventionell geschweißten Proben aus S960QL Residual stress Determination in conventionally welded specimens by means of X-ray diffraction

7.3.1 Stumpfstöße aus S960Q Butt welds made from S960Q

An den mit konventionellem Zusatzwerkstoff geschweißten Stumpfstößen mit DY-Nahtvorbereitung wurden Eigenspannungen an der zuerst (Decklage 1) und zuletzt geschweißten (Decklage 2) Lage ermittelt, Abbildung 77 und Abbildung 78. Die Längseigenspannungen der Decklage 1 weisen am Nahtübergang im Mittel einen Betrag von 150 MPa und in der WEZ, in ca. 8-10 mm Entfernung von der Schweißnahtmitte, einen Betrag von 250 MPa auf. Im Schweißgut wurden Eigenspannungen zwischen 100 MPa und 200 MPa gemessen. Die Zugeigenspannungen gehen in einem Abstand von 10-12 mm von der Schweißnahtmitte in Druck über. Im Grundwerkstoff (gestrahlter Bereich) liegen Druckeigenspannungen bis zu -300 MPa vor. Die Quereigenspannungen sind in gesamtem Verlauf im Druckeigenspannungsbereich. Am Nahtübergang liegen die Beträge der Quereigenspannungen zwischen -50 MPa und -75 MPa und im Grundwerkstoff -220 MPa.

Während die Decklage 2 einen ähnlichen Längseigenspannungsverlauf zeigt wie die Decklage 1, weist der Quereigenspannungsverlauf der Decklage 2 eine andere Charakteristik auf. In der Querrichtung wurde der maximale Wert mit 300 MPa in der Schweißnahtmitte ermittelt. Am Nahtübergang fallen die Quereigenspannungen ab und liegen zwischen -100 MPa und -150 MPa.

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

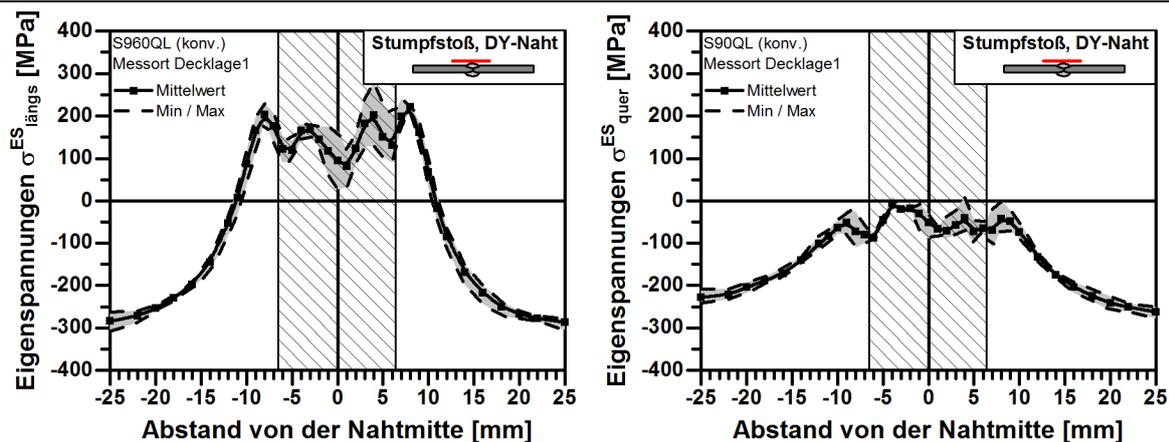


Abbildung 77 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. DY-Naht, Decklage 1

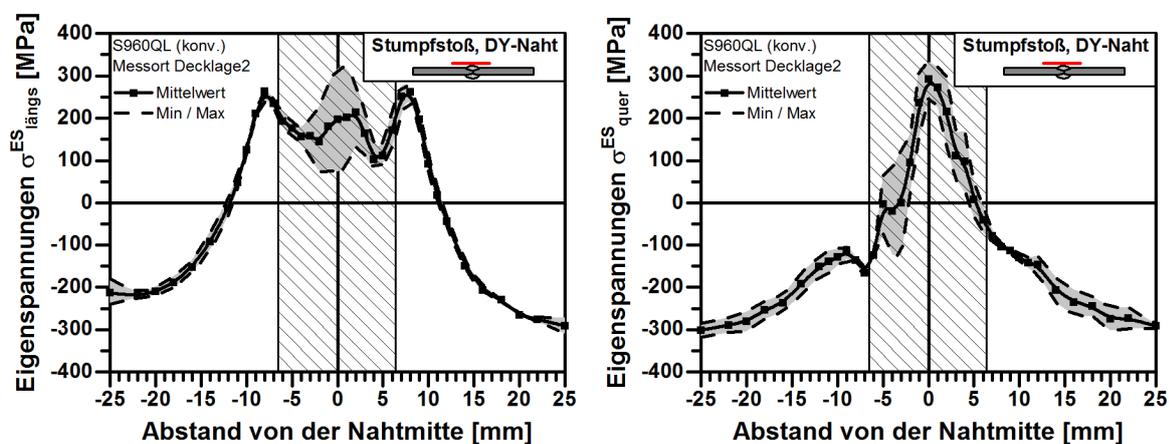


Abbildung 78 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. DY-Naht, Decklage 2

7.3.2 Kreuzstöße aus S960Q Cruciform joints made from S960Q

Abbildung 79 bis Abbildung 82 zeigen Ergebnisse der röntgenographischen Eigenspannungsmessungen der Kreuzstößen mit HV-Naht aus S960QL. Es wurden Längs- und Quereigenspannungen der Decklage (Seite 1 und Seite 2) und Wurzellage (Seite 1 und Seite 2) gemessen. Am Nahtübergang der Decklage/Seite 1 und am Nahtübergang der Decklage/Seite 2 sind die Längseigenspannungen nahe Null. Mit zunehmendem Abstand vom Nahtübergang nehmen die Eigenspannungen zu. In einem Anstand von 3-4 mm erreichen die Längseigenspannungen das Maximum. Es wurden Zugeigenspannungen von 150 MPa (Seite 1) und 250 MPa (Seite 2) gemessen. Ab einer Entfernung 5 mm von der Schmelzlinie bis in den Grundwerkstoff liegen nur noch Druckeigenspannungen vor. Die Verläufe der Quereigenspannungen in rechten Teilbildern zeigen Eigenspannungen von -50 MPa (Seite 1) und +20 MPa (Seite 2). Die Quereigenspannungen der Decklage/Seite 1 nehmen in weiterem Verlauf bis ca. 5 mm geringfügig zu und fallen dann in Druckeigenspannungsbereich. Im Grundwerkstoff

wurden Druckeigenspannungen von -250 MPa gemessen. Im Nahtübergang der Decklage/Seite 2 liegen Zugeigenspannungen von 20 MPa vor. Die Quereigenspannungen gehen in unmittelbarer Nähe der Schmelzlinie im Druck über und bleiben in weiterem Verlauf im Druck.

An den Nahtübergängen der Wurzellage sind die Längseigenspannungsbeträge mit ca. 20 MPa (Seite 1) und 50 MPa (Seite 2) sehr klein. Im Abstand von 5 mm steigen die Längseigenspannungen zu einem Maximum an und im Mittel erreichen bis 300 MPa. In weiterem Verlauf zum Grundwerkstoff hin fallen die Eigenspannungen ab. Die Quereigenspannungen (Teilbilder rechts) am Nahtübergang sind gering, -10 MPa und -50 MPa. An der Wurzellage/Seite 1 steigen die Eigenspannungen in weiterem Verlauf geringfügig an. Bei einem Abstand von 5 mm vom Nahtübergang wurde 50 MPa gemessen. An der Wurzellage/Seite 2 liegen die Quereigenspannungen im gesamten Verlauf im Druck. Im Grundwerkstoff wurden Werte über -300 MPa ermittelt.

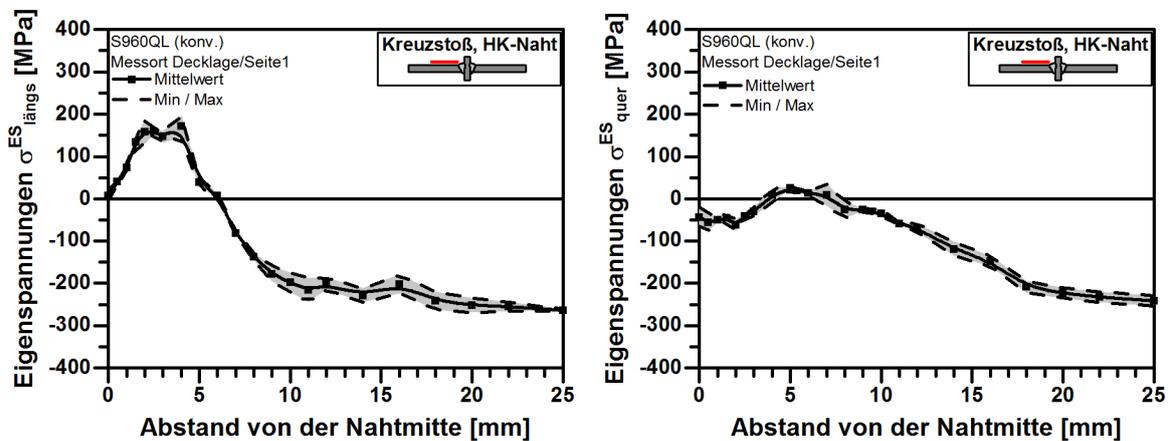


Abbildung 79 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. HK-Naht, Decklage 1

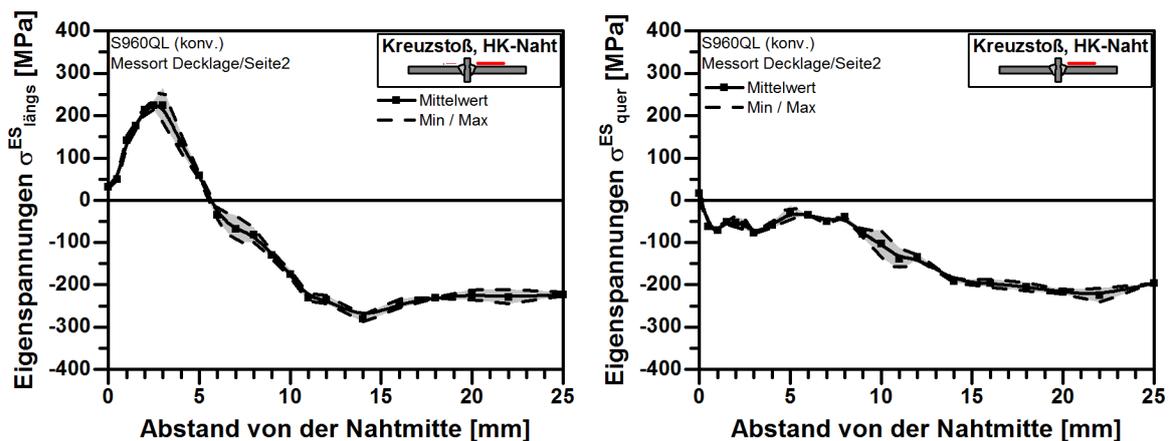


Abbildung 80 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. HK-Naht, Decklage 2

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

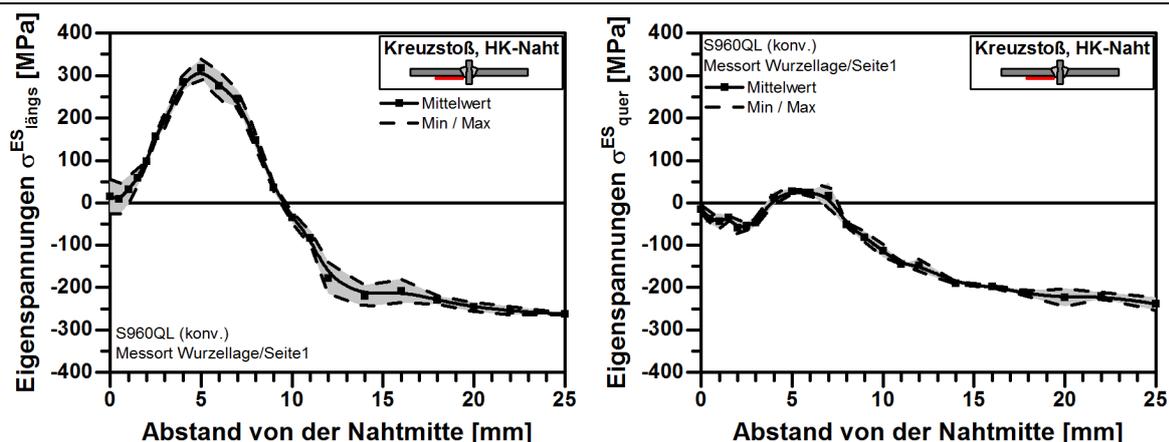


Abbildung 81 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. HK-Naht, Wurzellage 1

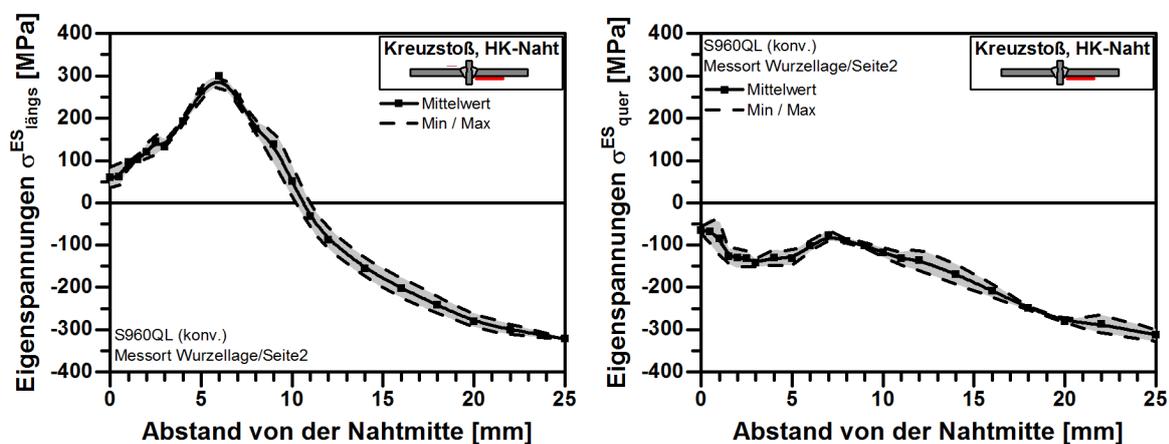


Abbildung 82 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL konv. HK-Naht, Wurzellage 2

7.3.3 Überlappstoß aus S960Q Overlap joint made from S960Q

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen an konventionell geschweißten beidseitigen Überlappstoßen aus S960QL sind in den Abbildung 83 und Abbildung 84 gezeigt. Die Längseigenspannungen am Nahtübergang der Decklage 1 (zuerst geschweißt) liegen bei 220 MPa. An der Decklage 2 wurden Längseigenspannungen von 260 MPa gemessen. Das Maximum von 250 MPa (Decklage 1) bzw. 300 MPa (Decklage 2) liegt in unmittelbarer Nähe der Schmelzlinie. Bis einem Abstand von 3 mm zur Schmelzlinie wurden Zugeigenspannungen vorgefunden. Mit zu nehmendem Abstand von der Schmelzlinie werden Druckeigenspannungen gemessen. Sie erreichen Werte bis -300 MPa. Die Quereigenspannungsverläufe in den rechten Teilbildern weisen auf der gesamten Messstrecke Druckeigenspannungen auf. Am Nahtübergang erreichen die Druckeigenspannungen -150 MPa (Decklage 1) und -120 MPa (Decklage 2). Im Grundwerkstoff wurden Druckeigenspannungen von bis -300 MPa ermittelt.

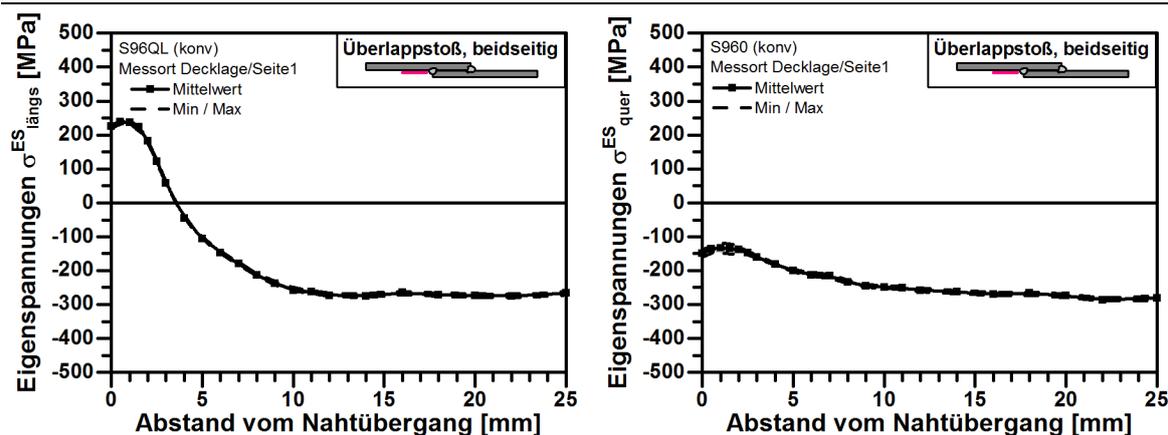


Abbildung 83 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL, Überlappstoß, beidseitig Decklage/Seite1

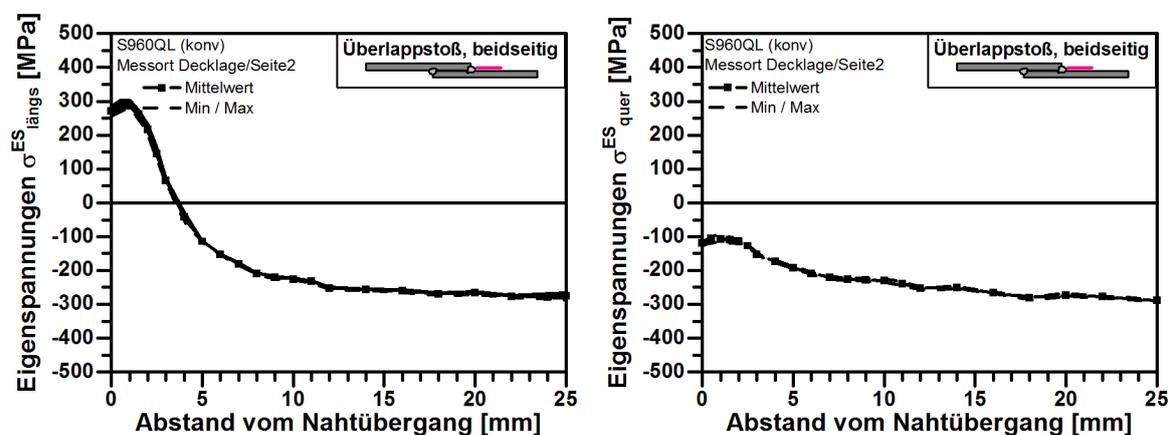


Abbildung 84 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL, Überlappstoß, beidseitig Decklage/Seite2

7.4 Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an LTT-geschweißten Proben aus S355J2+N

Residual stress determination in LTT-welded specimens by means of X-ray diffraction

7.4.1 Stumpfstoße aus S355J2+N

Butt welds made from S355J2+N

Die Abbildung 85 und Abbildung 86 zeigen die Eigenspannungsverläufe des Stumpfstoßes mit V-Naht. Die maximalen Längseigenspannungen von 170 MPa wurden, wie beim konventionell geschweißten Stumpfstoß, mit V-Naht (200 MPa) in der WEZ (10-11 mm von der Nahtmitte) gemessen. Der Nahtübergang und das Schweißgut befinden sich im Druckbereich. In der Schweißnaht liegen Druckeigenspannungen bis -200 MPa vor. Der Grundwerkstoff weist, bedingt durch Reinigungsstrahlen des Grundmaterials vor dem Schweißen, Druckeigenspannungen bis -200 MPa auf. Der Quereigenspannungsverlauf der Decklage zeigt einen deutlich anderen Verlauf im Vergleich zu dem

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

konventionell geschweißten Stumpfstoß mit V-Naht auf. In der Nahtmitte wurden maximale Zugeigenspannungen von 350 MPa im Mittel gemessen. Am Nahtübergang fallen die Quereigenspannungen in den Druckbereich und weisen, wie der Grundwerkstoff, einen Betrag von ca. -200 MPa auf.

Der Verlauf der Längseigenspannungen der Wurzellage weist am Nahtübergang Eigenspannungen nahe Null auf. Das Zugeigenspannungsmaximum befindet sich in der WEZ und nimmt einen Wert von ca. 150 MPa an. Im Grundwerkstoff wurden ebenfalls Druckeigenspannungen von -200 MPa gemessen. Am Nahtübergang der Wurzel betragen die Quereigenspannungen zwischen -80 MPa und -100 MPa.

Abbildung 87 und Abbildung 88 zeigen die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen des Stumpfstoßes mit DY-Naht der LTT-geschweißten Proben aus S355J2+N. Die Längseigenspannungen der Decklagen 1 und 2 (Teilbilder links) weisen ein Maximum von 170 bis 200 MPa im Schweißgut auf. Die Druckeigenspannungen im Grundwerkstoff haben einen Betrag von -200 MPa. Die Quereigenspannungen weisen das Maximum direkt im Schweißgut auf. Während die Eigenspannungen der Decklage 1 über dem gesamten Schweißgut fast konstant sind, weist die Decklage 2 in der Schweißnahtmitte ein lokales Maximum auf. Sie betragen in der Decklage 1 ca. 200 MPa und in der Decklage 2 ca. 250 MPa. An den Nahtübergängen der Querrichtung wurden Druckeigenspannungen von ca. -120 MPa und im Grundwerkstoff von -200 MPa gemessen.

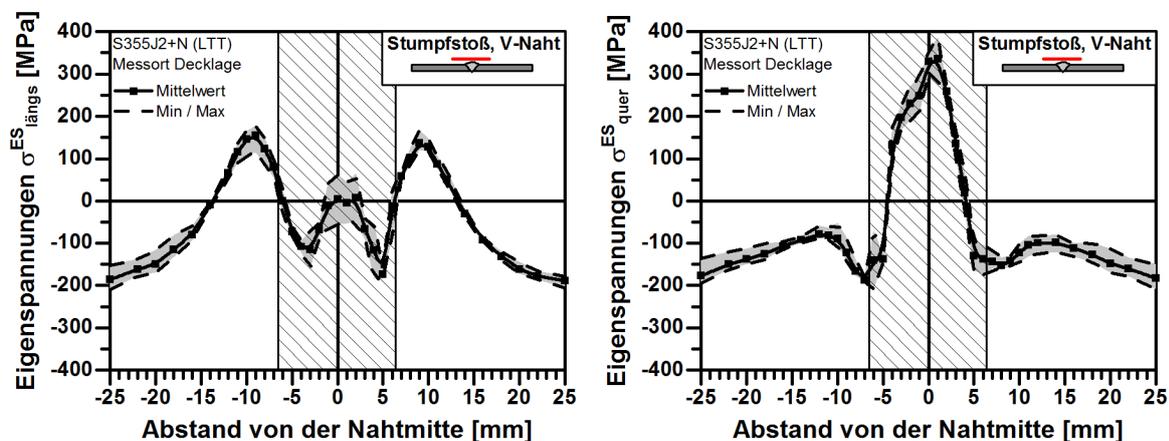


Abbildung 85 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N LTT, V-Naht, Decklage

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

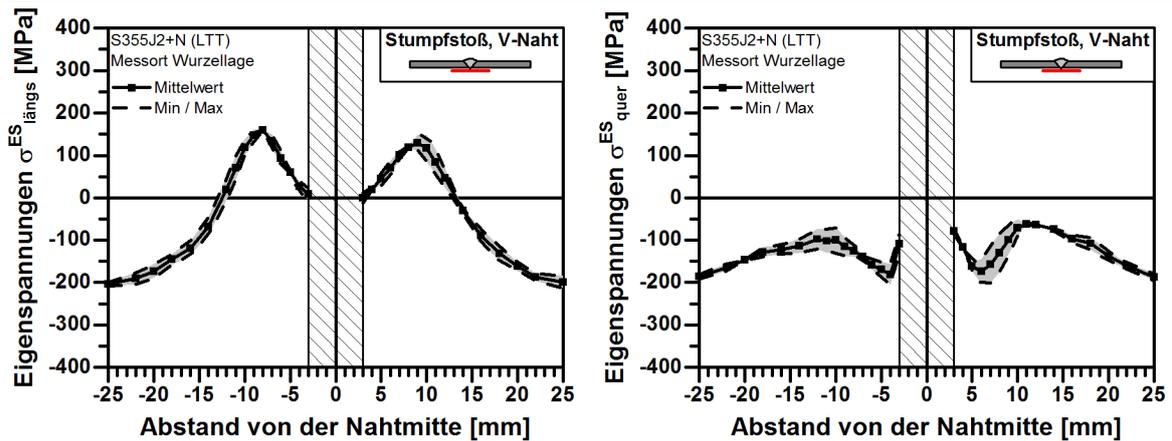


Abbildung 86 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N LTT, V-Naht,

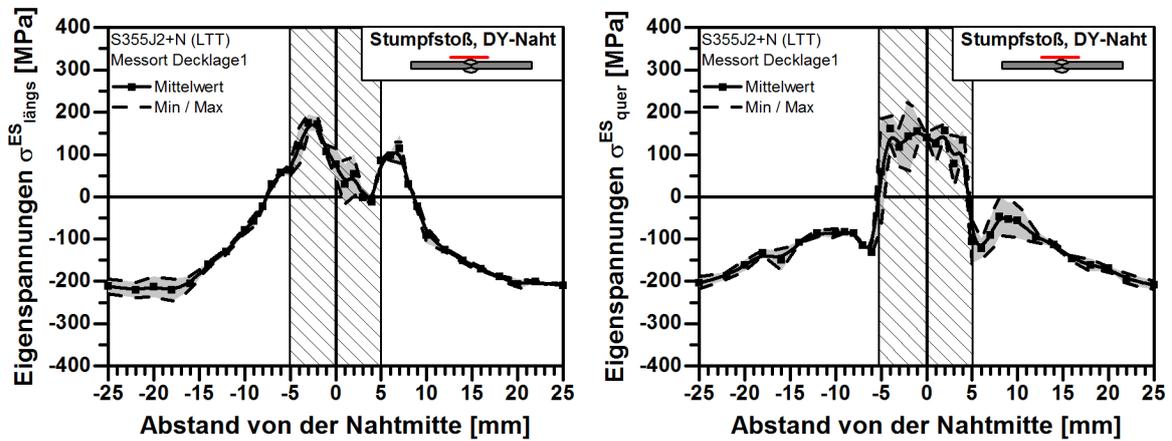


Abbildung 87 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N LTT, DY-Naht, Decklage 1

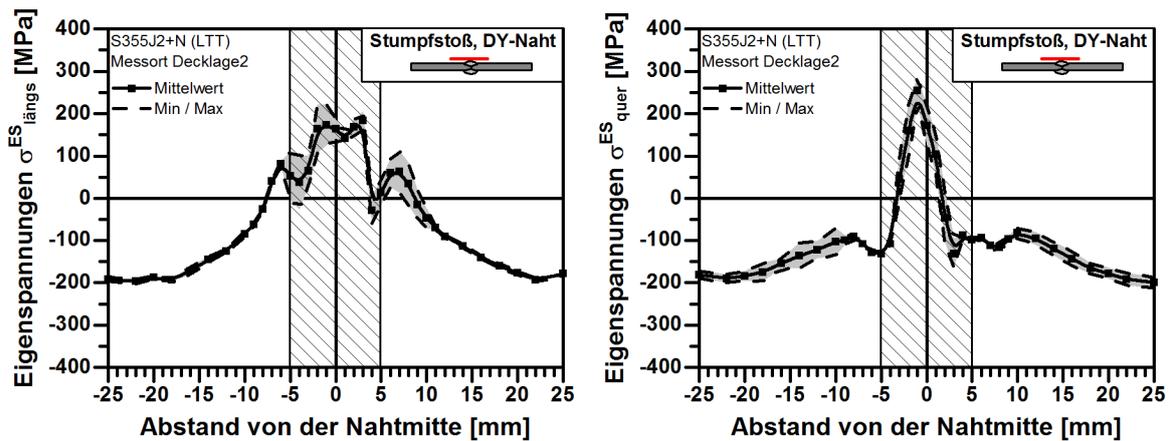


Abbildung 88 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355 J2+N LTT, DY-Naht, Decklage 2

7.4.2 Kreuzstöße aus S355J2+N Cruciform joints made from S355J2+N

Die Ergebnisse der LTT-geschweißten Kreuzstöße mit HK-Naht aus S355J2+N sind in Abbildung 89 bis Abbildung 92 dargestellt. Die Längseigenspannungsverläufe der Decklagen 1 und 2 (rechts und links der Steife gemessen) sind im Wesentlichen mit den konventionell geschweißten vergleichbar. Allerdings fallen die Zugeigenspannungen in der WEZ insgesamt mit maximal 110 MPa niedriger aus. Am Nahtübergang sind die Längseigenspannungen mit Werten von 25 MPa und 60 MPa etwa gleich. Ab 5 mm Abstand vom Nahtübergang bis in den Grundwerkstoff hinein sind nur noch Druckeigenspannungen vorhanden. Der Verlauf der Quereigenspannungen weist auf der gesamten Messstrecke Druckeigenspannungen auf. Am Nahtübergang wurden Druckeigenspannungen von -120 MPa bzw. -180 MPa und im Grundwerkstoff -200 MPa gemessen.

Einen signifikant unterschiedlichen Verlauf zeigen die Längseigenspannungen der Wurzellagen im Vergleich zu den konventionell geschweißten Kreuzstößen. Die an Wurzellage 1 und 2 gemessene Längseigenspannungen weisen am Nahtübergang Werte von 60 bis 70 MPa auf, die dann bis einem Abstand von 5-6 mm vom Nahtübergang auf null zurückfallen. Im weiteren Verlauf nehmen die Längseigenspannungen zu und erreichen bei einem Abstand von 10 mm von der Schmelzlinie einen Wert von ca. 100 MPa. Dann gehen sie in 13 mm Abstand von der Schmelzlinie in den Druckbereich über. Im Grundwerkstoff liegen Druckeigenspannungen von ca. -200 MPa vor. Die Quereigenspannungen (Teilbilder rechts) zeigen am Nahtübergang Werte nahe null auf, die dann auf der gesamten Messstrecke im Druck bleiben.

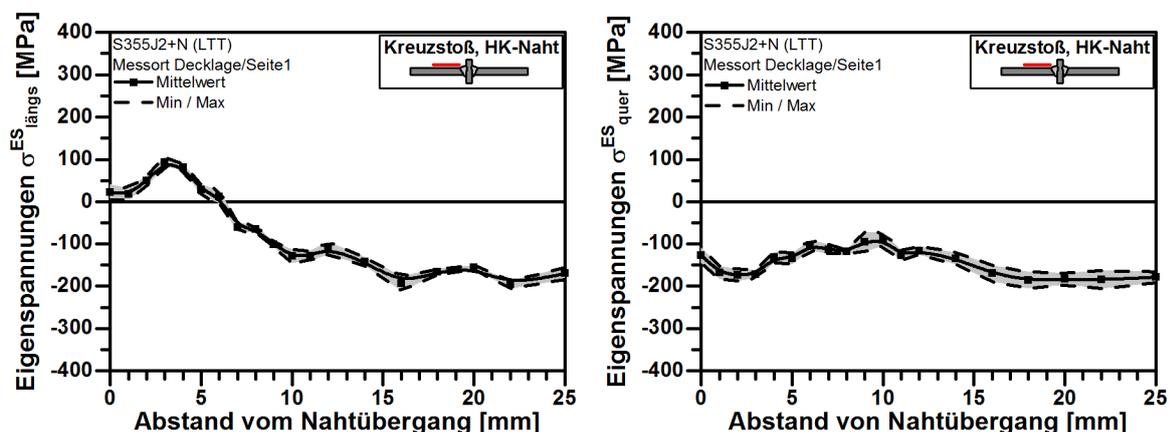


Abbildung 89 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT HK-Naht;

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an
Schwingproben
Determination of residual stresses and residual stress relaxation

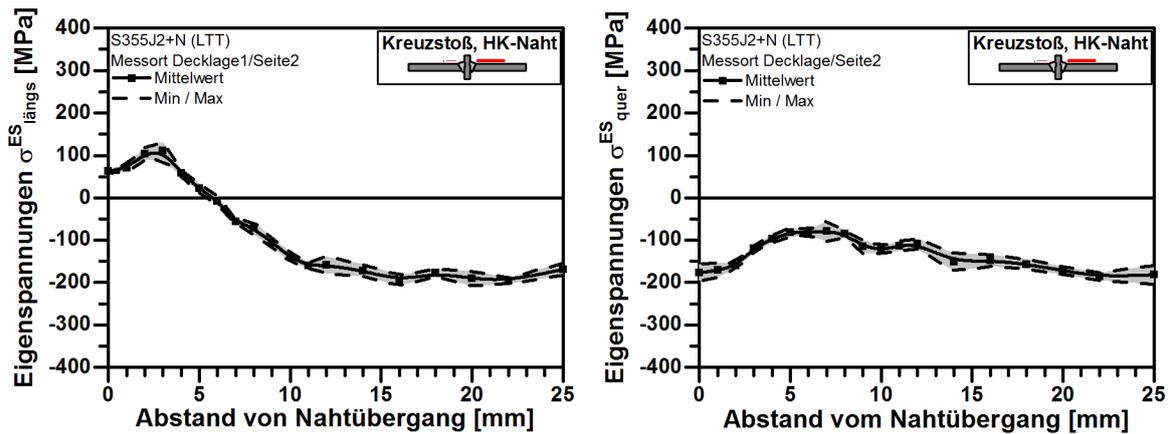


Abbildung 90 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT HK-Naht; Decklage Seite 2

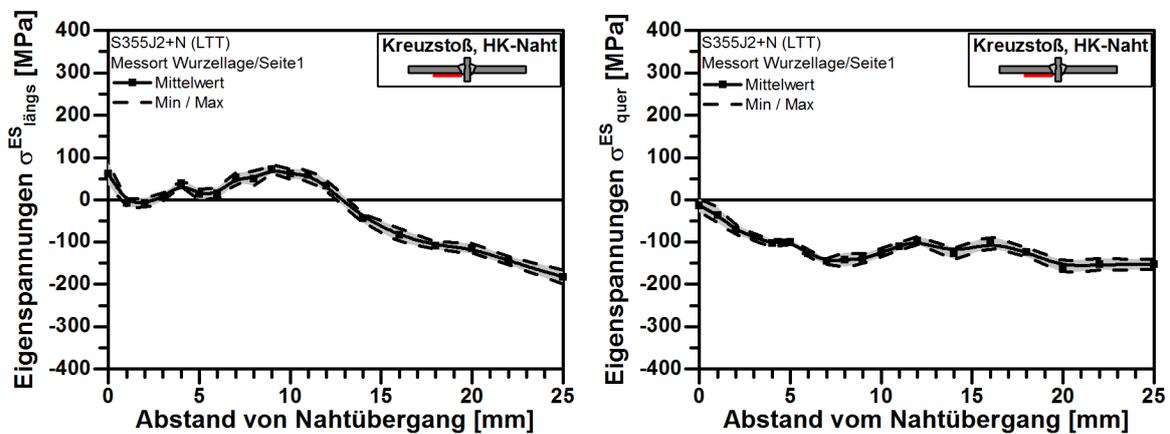


Abbildung 91 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT HK-Naht; Wurzellage Seite 1

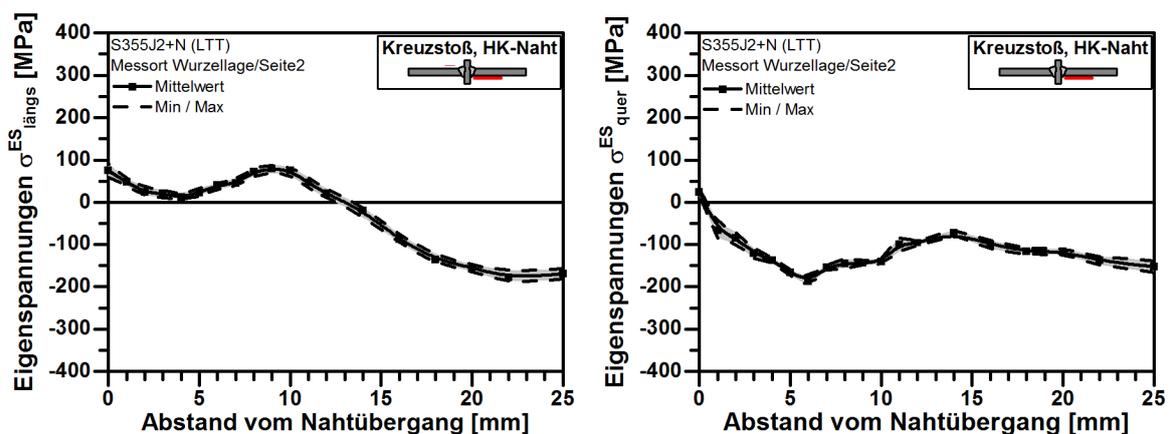


Abbildung 92 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT HK-Naht; Wurzellage Seite 2

7.4.3 Überlappstöße aus S355J2+N Overlap joints made from S355J2+N

Die Ergebnisse der ein- und beidseitig mit LTT-Zusatzwerkstoff geschweißten Überlappstöße sind in Abbildung 93 bis Abbildung 95 dargestellt. Die Eigenspannungsverläufe weisen eine ähnliche Charakteristik wie bei konventionell geschweißten Überlappstößen auf, allerdings fallen die Zugeigenspannungsbeträge in der Längsrichtung geringer aus. Während hier ein Zugeigenspannungmaximum von ca. 100 MPa ermittelt wurde, liegen diese bei konventionell geschweißten Proben zwischen 200 bis 300 MPa. In einem Abstand von 5 mm vom Nahtübergang gehen die Zugeigenspannungen in den Druckbereich über. Im Grundwerkstoff wurden, bedingt durch das Reinigungsstrahlen der Proben vor dem Schweißen, Druckeigenspannungen bis -250 MPa gemessen. Die Quereigenspannungen am Nahtübergang betragen zwischen -100 und 200 MPa.

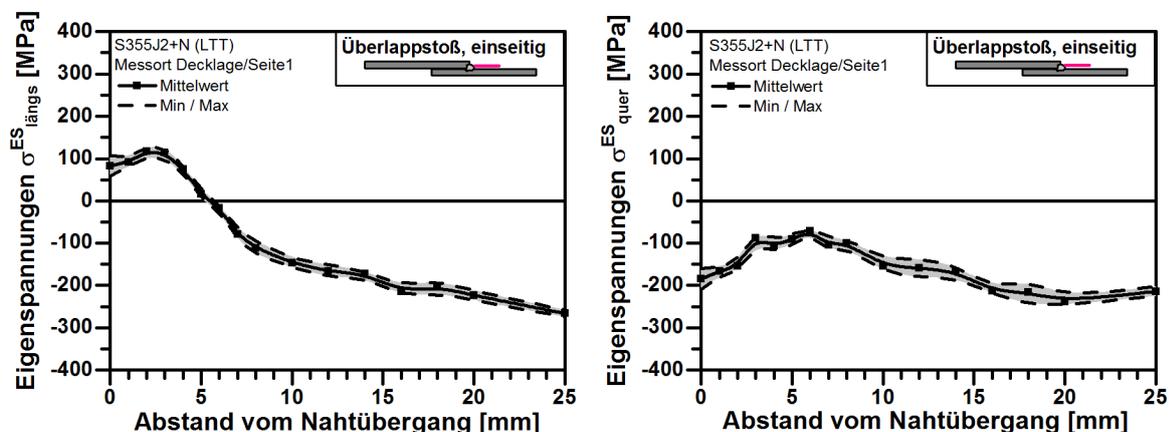


Abbildung 93 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355J2+N LTT Überlappstoß einseitig; Seite 1

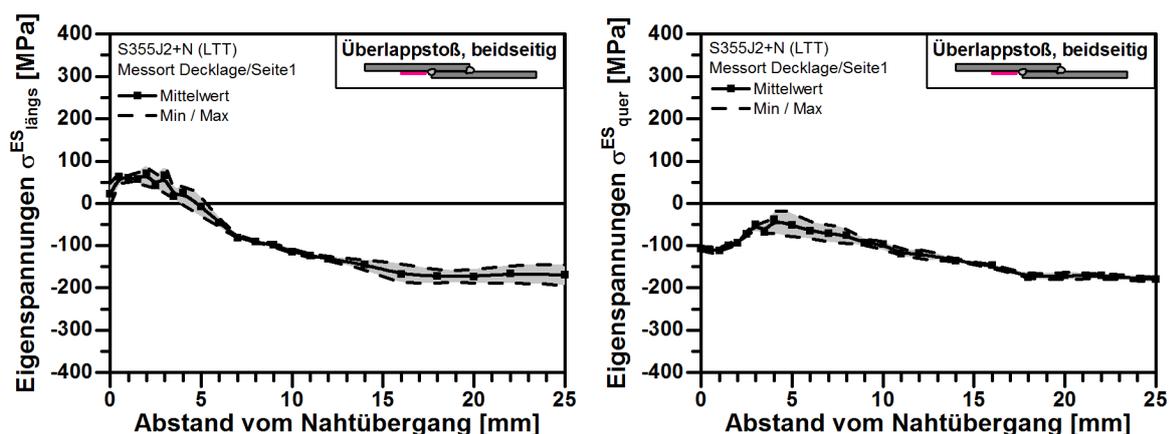


Abbildung 94 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S355J2+N LTT Überlappstoß beidseitig; Seite 1

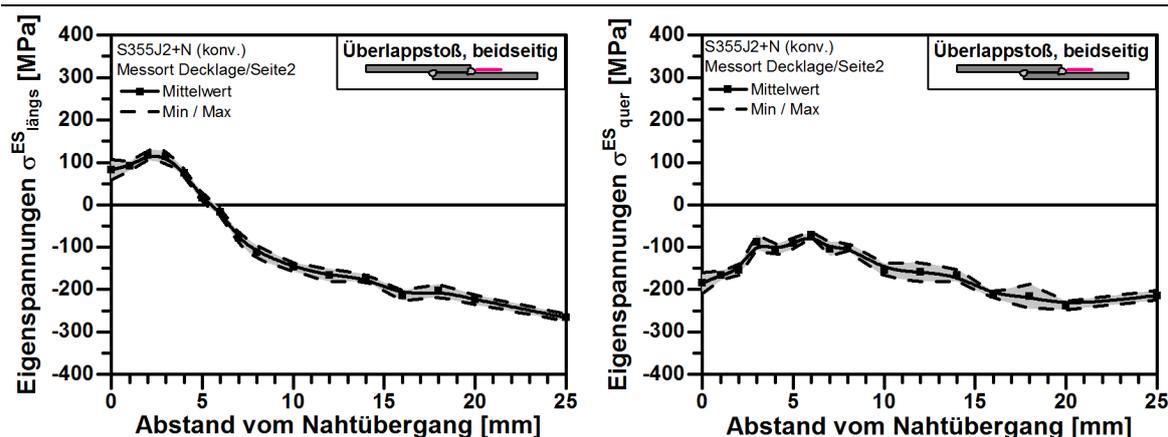


Abbildung 95 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT Überlappstoß beidseitig; Seite 2

7.4.4 Längssteife aus S355J2+N

Longitudinal stiffer made from S355J2+N

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der geschweißten Längssteifen aus S355J2+N mit LTT-Zusatz sind in Abbildung 96 und Abbildung 97 dargestellt. Die Eigenspannungen wurden an beiden Seiten der Steife (Seite 1 und 2) gemessen. Die Längseigenspannungsverläufe bei Längssteifen mit LTT-Zusatz zeigen ein anderes Bild im Vergleich zu den konventionell geschweißten Proben. Am Nahtübergang wurden Druckeigenspannungen im Mittel von -50 MPa gemessen. In weiteren Verlauf ist ein Anstieg der Eigenspannungen bis ca. 100 MPa zu verzeichnen, die dann ab einem Abstand von 6 mm bis zum Ende der Messstrecke vollständig im Druckeigenspannungsbereich verbleiben. Die Quereigenspannungsverläufe zeigen am Nahtübergang Zugeigenspannungen von 200 MPa bzw. 300 MPa. Ihr Maximum liegt in unmittelbarer Nähe der Schmelzlinie. Sie betragen 220 MPa und 350 MPa. Ab einem Abstand von 3 mm bis in den Grundwerkstoff wurden Druckeigenspannungen bis -400 MPa gemessen.

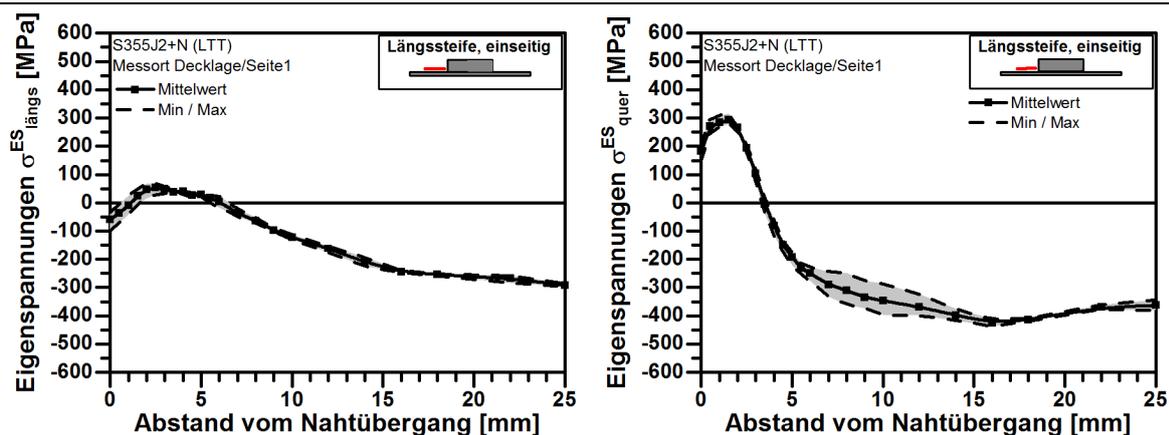


Abbildung 96 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT Längssteife; Decklage 1

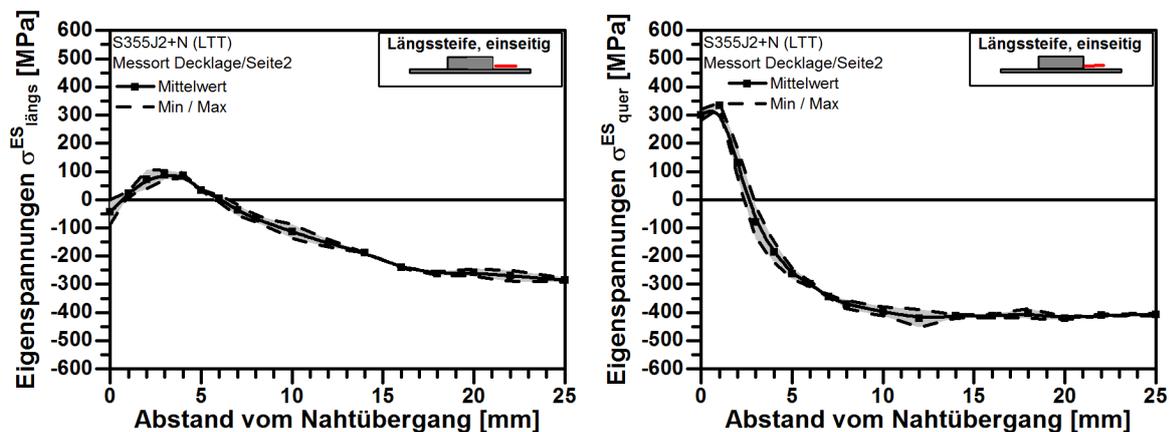


Abbildung 97 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) 355 J2+N LTT Längssteife; Decklage 2

7.5 Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an LTT-geschweißten Proben aus S960Q

Residual stress determination in LTT-welded specimens by means of X-ray diffraction

7.5.1 Stumpfstöße aus S960Q

Butt welds made from S960Q

Die Eigenspannungsmessungen am Stumpfstoß mit V-Naht wurden an der Deck- und Wurzellage durchgeführt. Der Längseigenspannungen der Decklage sind in Abbildung 98 gezeigt. In der Schweißnaht bewegen sich die Eigenspannungen vom Druckbereich mit -70 MPa bis zum Zugeigenspannungsbereich mit 250 MPa. Das Maximum mit 280 MPa wurde in der WEZ (± 10 mm von der Schweißnahtmitte) ermittelt. Am Nahtübergang wurden Zugeigenspannungen von 150 MPa gemessen. Die Quereigenspannungen zeigen geringe Zugeigenspannungen i.H.v. ca. 25 MPa in der Schweißnahtmitte.

Im weiteren Verlauf der Messstrecke werden nur noch Druckeigenspannungen vorgefunden. Im Nahtübergang und im Grundwerkstoff werden Druckeigenspannungen von -150 MPa bzw. -330 MPa gemessen.

Die Ergebnisse der Wurzellage sind Abbildung 99 zu entnehmen. Längseigenspannungen zeigen einen symmetrischen Verlauf. Der Nahtübergang weist einen Zugeigenspannungsbetrag von ca. 60 MPa auf. In der WEZ, ± 10 mm von der Schweißnahtmitte, liegen die Eigenspannungsmaxima bei Beträgen von 275 MPa bzw. 290 MPa. In einem Abstand von 12 mm von der Schweißnahtmitte in Richtung Grundwerkstoff sind nur noch Druckeigenspannungen mit einem Maximum von -275 MPa vorhanden.

Abbildung 100 und Abbildung 101 zeigen die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen an Proben mit DY-Naht. Die Längseigenspannungen an der Decklage 1 weisen an der Schweißnaht und am Nahtübergang jeweils ein Maximum von etwa 200 MPa auf. Das Eigenspannungsminimum in der Schweißnaht beträgt ca. 60 MPa. Der Nulldurchgang wird in einem Abstand von ± 8 mm zur Schweißnahtmitte erreicht. Im Grundwerkstoff werden Druckeigenspannungen von ca. -320 MPa gemessen. Die Quereigenspannungen haben ihr Maximum in der Schweißnahtmitte und betragen 150 MPa. Im weiteren Verlauf fallen die Quereigenspannungen im Schweißgut ab und liegen am angrenzenden Nahtübergang bei -150 MPa.

Die Decklage 2 weist in der Schweißnaht geringe Zugeigenspannungen in der Längsrichtung auf, die dann zum Nahtübergang zunehmen und einen Höchstbetrag von 250 MPa erreichen. Der Nulldurchgang wird bei einer Entfernung von -7 mm bzw. 9 mm von der Nahtmitte erreicht. In weiterem Verlauf werden Druckeigenspannungen bis -300 MPa gemessen. Der Verlauf der Quereigenspannungen an der Decklage 2 ähnelt dem der Decklage 1. Das Zugeigenspannungsmaximum liegt in der Schweißnahtmitte und beträgt 200 MPa.

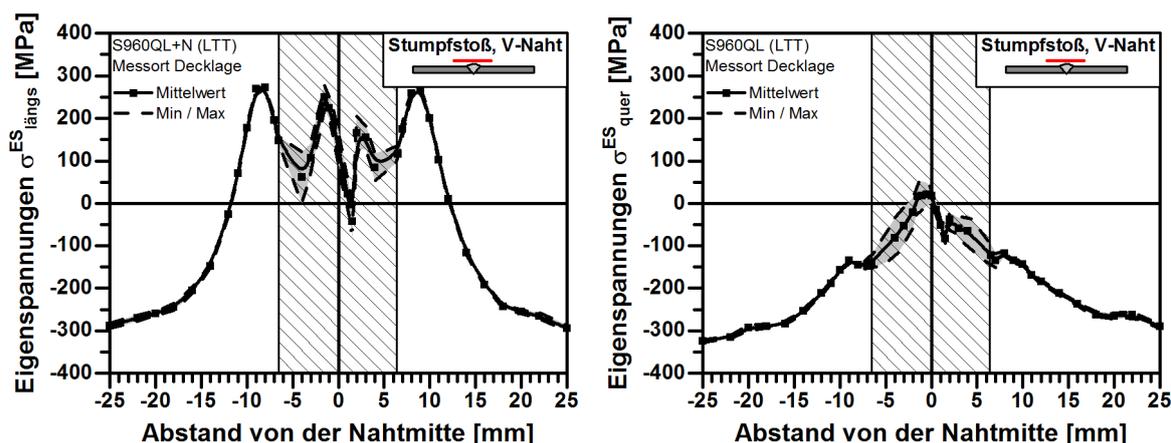


Abbildung 98 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT V-Naht; Decklage

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

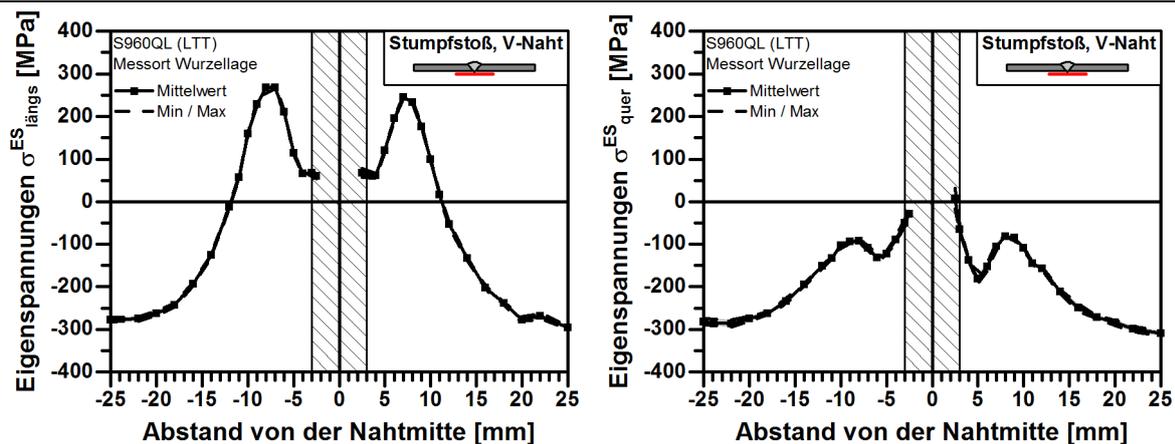


Abbildung 99 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT V-Naht; Wurzellage

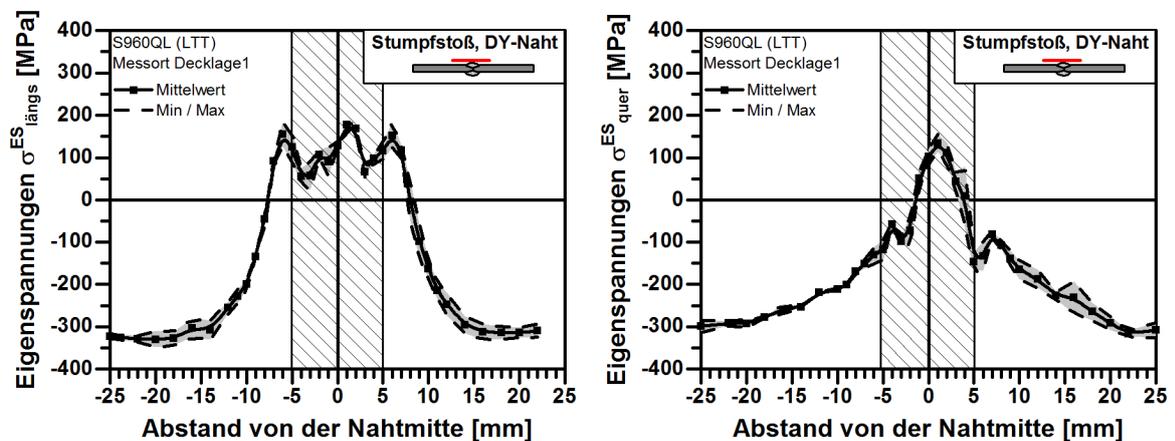


Abbildung 100 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT DY-Naht; Decklage 1

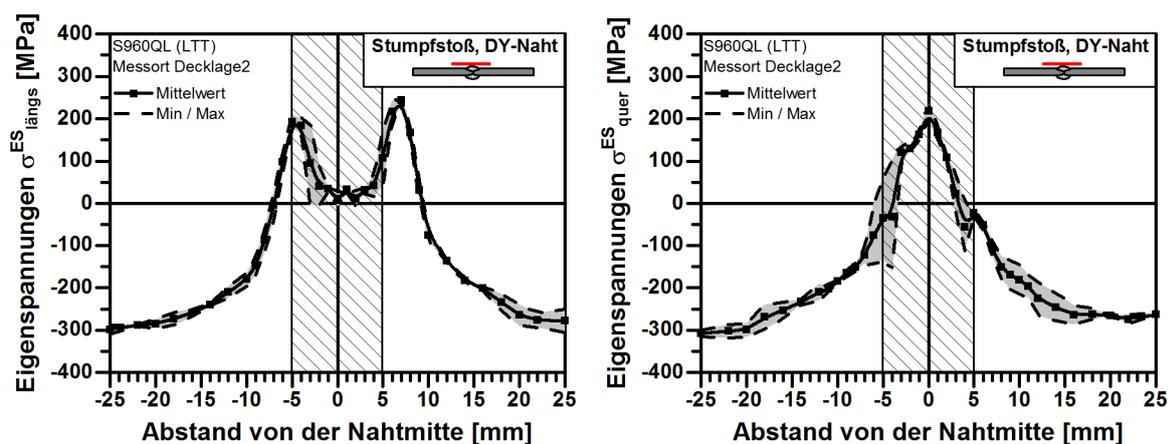


Abbildung 101 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT DY-Naht; Decklage 2

7.5.2 Kreuzstöße aus S960Q Cruciform joints made from S960Q

Die Eigenspannungsverläufe der Kreuzstöße mit HK-Naht aus S960QL werden in Abbildung 102 bis Abbildung 105 gezeigt. Es wurden Eigenspannungen der Decklagen und der Wurzellagen (rechts und links der Quersteife) in der Längs- und in der Quer- richtung gemessen. Am Nahtübergang der Decklagen wurden Längseigenspannungen im Mittel von ca. 100 MPa bestimmt. Die Längseigenspannungen nehmen bis zu einem Abstand von 2 mm vom Nahtübergang zu und betragen an den Decklagen 1 und 2 260 MPa bzw. 250 MPa. In einem Abstand von 5 mm von der Schmelzlinie entfernt fallen die Eigenspannungen in den Druckbereich und weisen im Grundwerkstoff -300 MPa auf. Die Quereigenspannungen an den Decklagen 1 und 2 bleiben auf der gesamten Messstrecke im Druck und am Nahtübergang zeigen Werte zwischen -150 MPa und -200 MPa. Im Grundwerkstoff werden Quereigenspannungen in Höhe von -300 MPa bis -330 MPa ermittelt.

Die Längseigenspannungen der Wurzellagen betragen am Nahtübergang 50 MPa bis 90 MPa. Im weiteren Verlauf bis zu einem Abstand von 6 mm werden Druckeigenspannungen mit geringen Beträgen gemessen. Bis zu einer Entfernung von ca. 14 mm werden Zugeigenspannungen mit einem Maximum von 200 bis 230 MPa ermittelt. Danach gehen die Längseigenspannungen in den Druckbereich über und im Grundwerkstoff sind Beträge von -200 bis -250 MPa vorhanden. Die Quereigenspannungen der Wurzellagen weisen am Nahtübergang Zugeigenspannungen zwischen 50 MPa bis 75 MPa auf. Ab einem Abstand von 4 mm von der Schmelzlinie wurden Zugeigenspannungen bis maximal 100 MPa gemessen.

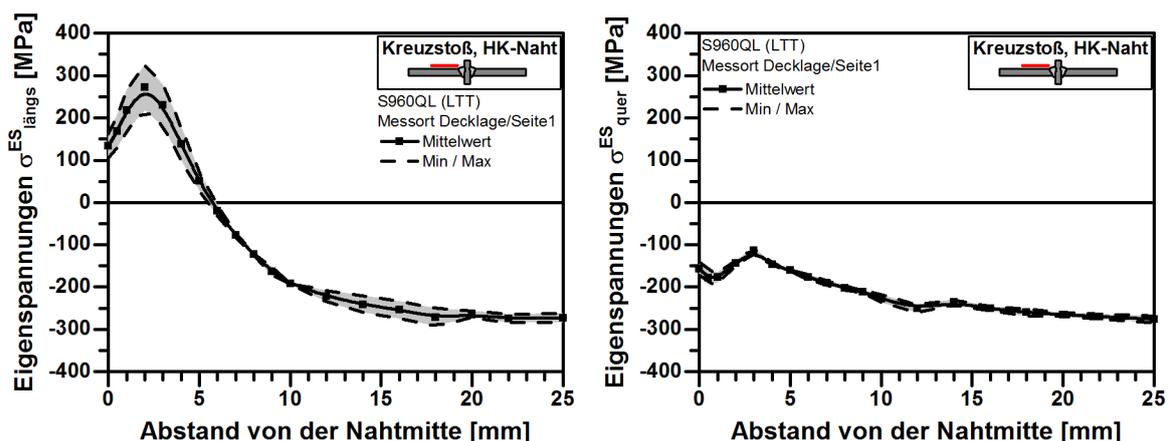


Abbildung 102 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL, LTT HK-Naht;

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

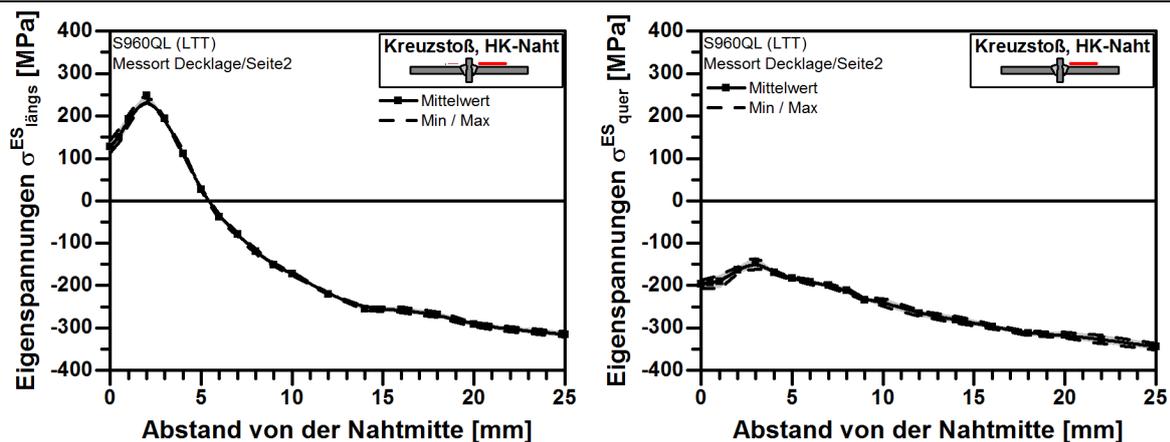


Abbildung 103 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL, LTT HK-Naht;

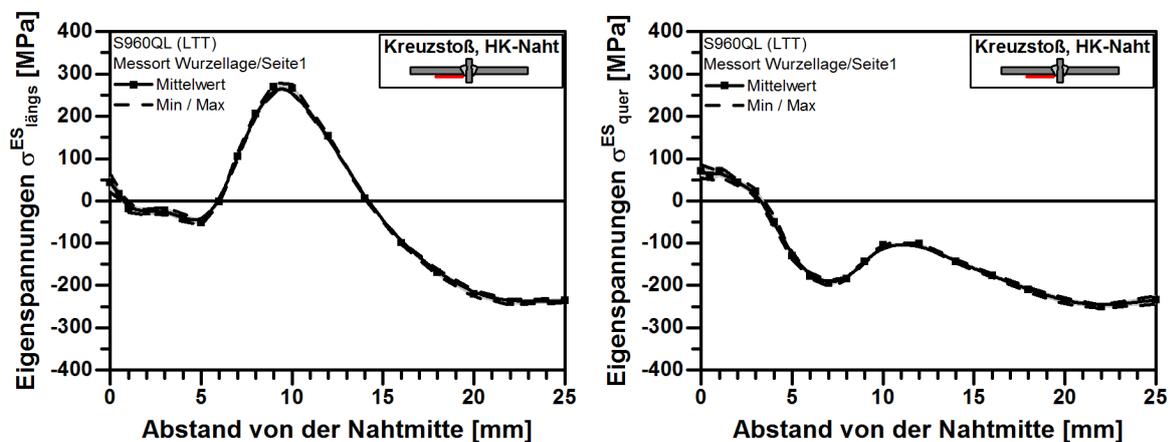


Abbildung 104 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL, LTT HK-Naht;

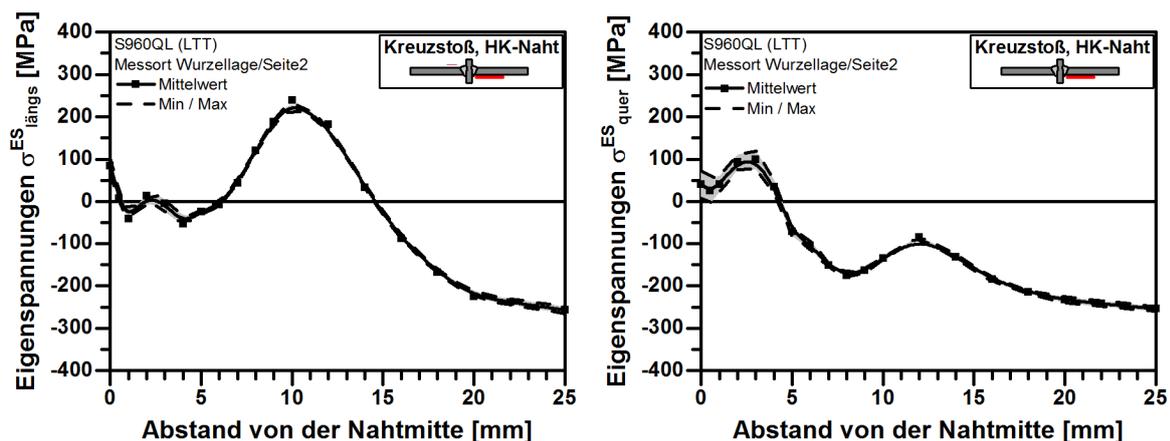


Abbildung 105 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL, LTT HK-Naht;

7.5.3 Überlappstöße aus S960Q Overlap joints made from S960Q

Die Untersuchungsergebnisse der Eigenspannungsmessungen an ein- und beidseitigen Überlappstößen werden in Abbildung 106 bis Abbildung 108 gezeigt. Die Längseigenspannungs- sowie die Quereigenspannungsverläufe der einseitig (Decklage) und beidseitig geschweißten Proben (Decklage 1 und 2), sind im Wesentlichen miteinander vergleichbar. Die Längseigenspannungen am Nahtübergang liegen zwischen 180 MPa bis 200 MPa. Sie nehmen in der WEZ bis 280 MPa zu. Die Längseigenspannungen erreichen die Nulllinie bei einem Abstand vom Nahtübergang von ca. 4 mm. Die Quereigenspannungen liegen auf der gesamten Messstrecke im Druckbereich mit Werten zwischen -50 MPa auf -400 MPa.

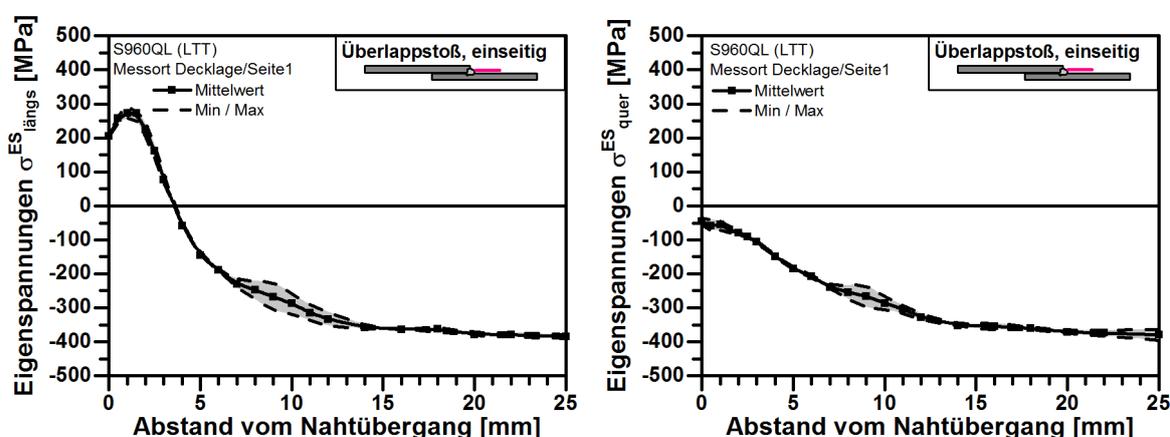


Abbildung 106 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT Überlappstoß, einseitig Seite 1

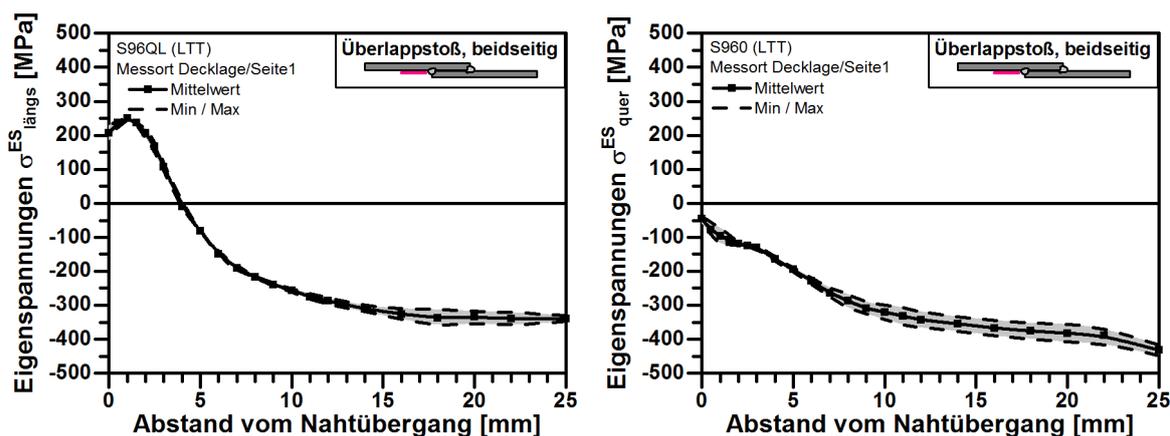


Abbildung 107 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT Überlappstoß, beidseitig, Seite 1

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

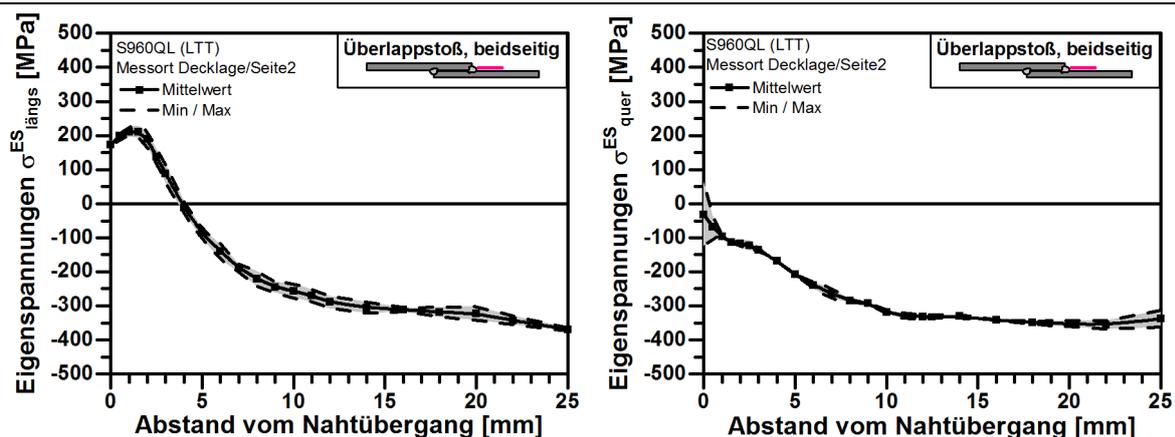


Abbildung 108 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT Überlappstoß, beidseitig Seite 2

7.5.4 Längssteife aus S960Q

Longitudinal stiffener made from S960Q

Die Längs- und Quereigenspannungsverläufe der Längssteifen aus S960QL, die links und rechts der Steife ermittelt wurden, sind in Abbildung 109 und Abbildung 110 gezeigt. Die Längseigenspannungen zeigen Zugeigenspannungen in geringen Höhen am Nahtübergang, die dann in unmittelbarer Nähe von der Schmelzlinie in Druckeigenspannungen übergehen. Mit zunehmendem Abstand vom Nahtübergang werden die Druckeigenspannungen höher und erreichen ein Maximum von ca. -400 MPa im Grundwerkstoff. Die Quereigenspannungen weisen am Nahtübergang Beträge bis 400 MPa auf, die schnell abfallen. In einem Abstand von 2 mm wird der Nulldurchgang erreicht. In 8 mm Abstand von der Schmelzlinie (im Grundwerkstoff) wurde ein Druckspannungsmaximum mit bis zu -500 MPa gemessen.

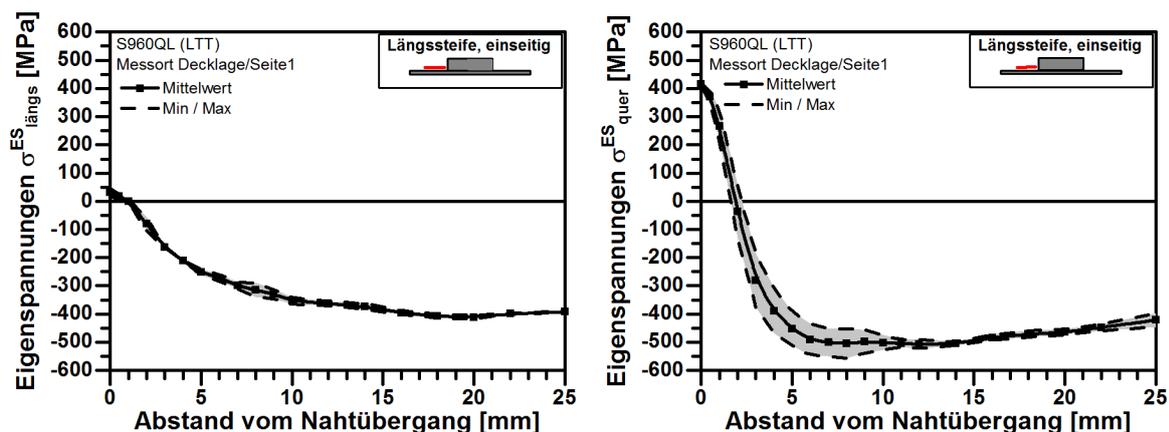


Abbildung 109 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT Längssteife; Seite 1

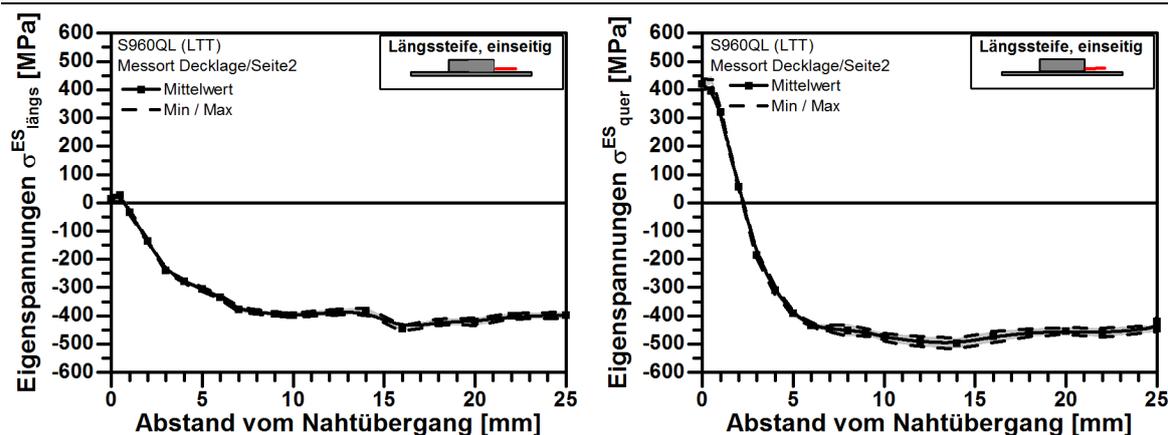


Abbildung 110 Längseigenspannungen (l.) und Quereigenspannung (r.) S960QL LTT Längssteife; Seite 2

7.6 Röntgenografische Bestimmung der Eigenspannungen an LTT-geschweißten Proben mit Nachbehandlung

Residual stress determination in LTT-welded specimens with post-weld treatment by means of X-ray diffraction

7.6.1 HFMI-Nachbehandlung

HFMI-treatment

Abbildung 111 bis Abbildung 114 zeigen die Eigenspannungsverläufe und Integralbreiten der LTT-geschweißten Stumpfstoße mit Schweißnahtnachbehandlung.

Die hochfrequente Hämmerbehandlung der Nahtübergänge mittels des Pit-Verfahrens erzeugte Druckeigenspannungen an den Nahtübergängen, Abbildung 111 und Abbildung 112. Diese wurden sowohl an der Nahtwurzel als auch an den Decklagen sowie in Längs- und Querrichtung ermittelt. Betragsmäßig traten die höchsten Druckeigenspannungen auf der Seite des Schweißgutes auf, was mit der höheren Festigkeit des LTT-Zusatzwerkstoffs zu begründen ist. In Längs- bzw. Querrichtung sind die erzeugten Druckeigenspannungen auf Deck- und Wurzelseite etwa vergleichbar.

Die Eigenspannungen in Proben aus hochfestem Grundwerkstoff S960Q fielen insgesamt erwartungsgemäß höher aus als beim S355J2+N. Beim S355J2+N wurden in den Nahtübergangskerben zwischen etwa -300 MPa und -500 MPa ermittelt. Beim S960Q erreichten die Druckeigenspannungen Beträge bis -600 MPa.

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben

Determination of residual stresses and residual stress relaxation

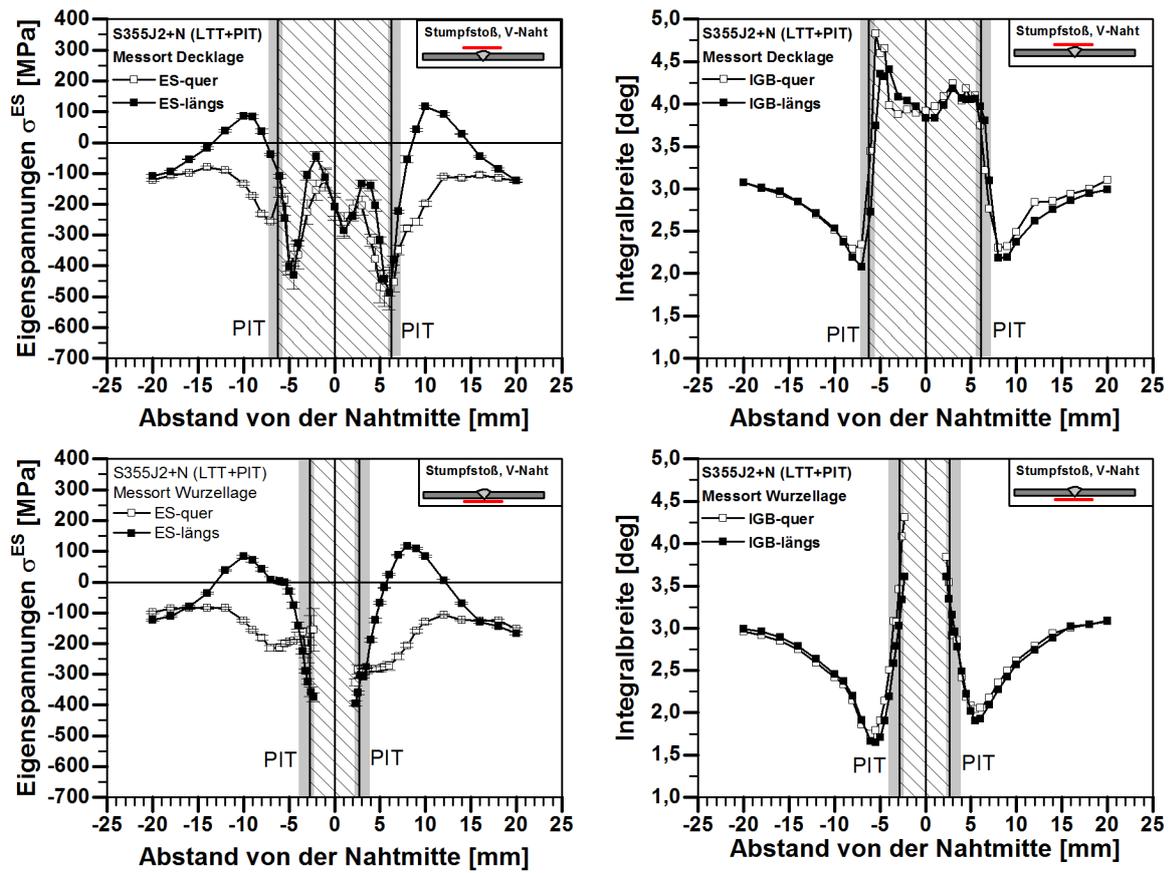


Abbildung 111 Eigenspannungen an Stumpfstoßen (V-Naht) aus S355J2+N, LTT-geschweißt und HFMI-nachbehandelt (Pit)

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben
 Determination of residual stresses and residual stress relaxation

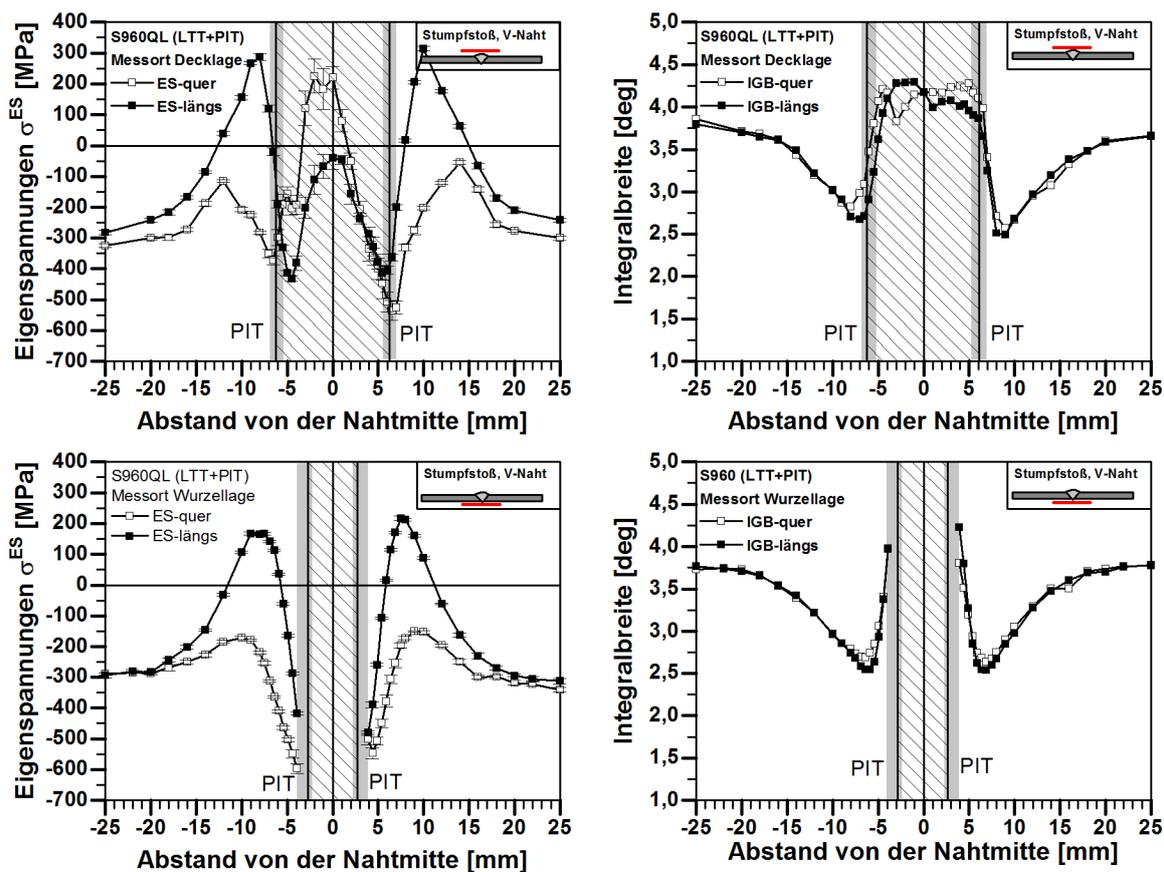


Abbildung 112 Eigenspannungen an Stumpfstößen (V-Naht) aus S960Q, LTT-geschweißt und HFMI-nachbehandelt (Pit)

7.6.2 WIG-Nachbehandlung TIG-treatment

Das WIG-Aufschmelzen der Nahtübergänge erzeugte uneinheitlichere Eigenspannungsverläufe als die HFMI-Behandlung. Während an den Decklagen des S355J2+N Zugeigenspannungen bis etwa 330 MPa erzeugt wurden, erreichten diese nur bis etwa 200 MPa im hochfesten S960Q, Abbildung 113 und Abbildung 114. An der Nahtwurzel wurden bei beiden Werkstoffen geringere Eigenspannungen erzeugt. Hier erreichten die Beträge Werte zwischen 100 MPa und -150 MPa.

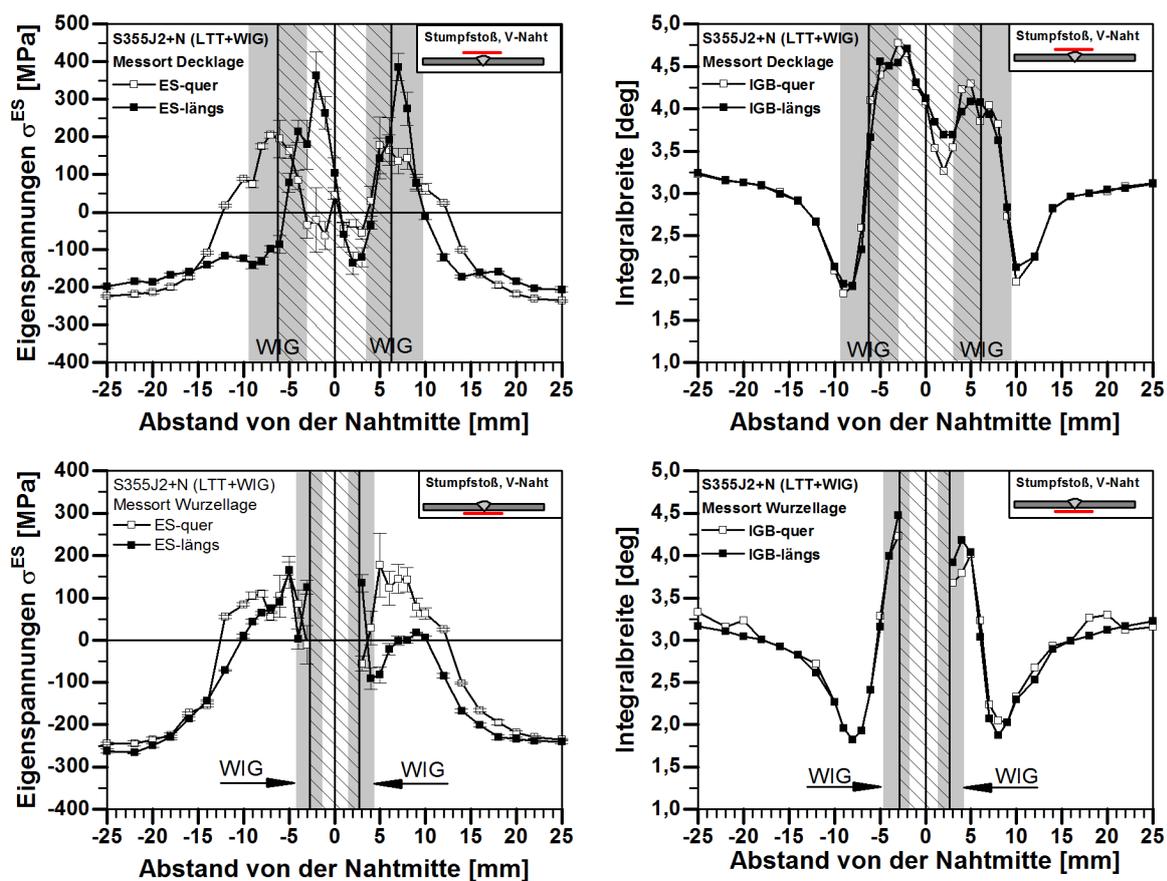


Abbildung 113 Eigenspannungen an Stumpfstößen (V-Naht) aus S355J2+N, LTT-geschweißt und WIG-nachbehandelt

Untersuchung der Eigenspannungen und des Eigenspannungsabbaus an Schwingproben
 Determination of residual stresses and residual stress relaxation

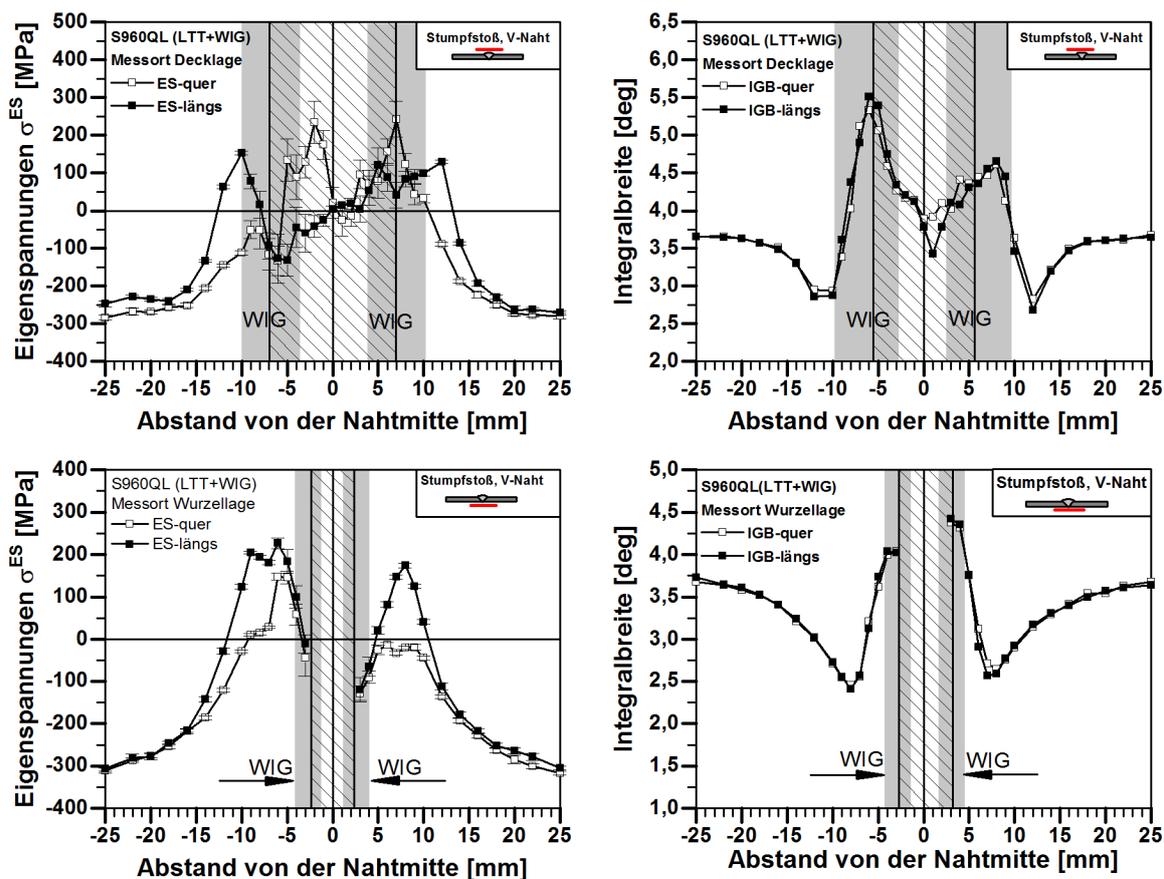


Abbildung 114 Eigenspannungen an Stumpfstößen (V-Naht) aus S960Q, LTT-geschweißt und WIG-nachbehandelt

7.7 Untersuchungen zur Eigenspannungsstabilität Investigations on residual stress relaxation

7.7.1 Eigenspannungsabbau infolge zügiger Beanspruchung Residual stress relaxation under static loading

Durch wiederholte Eigenspannungsmessungen wurde die Auswirkung einer zügigen Belastung quer zur Schweißnaht (Zug) auf den Eigenspannungszustand untersucht. Die zügigen Beanspruchungen wurden in 6 Belastungsstufen, beginnend bei einer Nennspannung von 60 MPa bis 360 MPa (nominelle Streckgrenze) durchgeführt. Die Messung der Eigenspannungen erfolgt im ausgebauten Zustand.

7.7.1.1 Eigenspannungsabbau an Längssteifen aus S355J2+N (konventionell) Residual stress relaxation in longitudinal stiffeners S355J2+N (conventional)

In Abbildung 115 sind die Ergebnisse der Eigenspannungsstabilität der Längssteifen aus S355J2+N (konventionell geschweißt) gezeigt. Die Zugspannung wurde stufenweise aufgebracht und inkrementell die Eigenspannungen gemessen.

Im Ausgangszustand lagen am Nahtübergang Zugeigenspannungen i.H.v. ca. 95 MPa in Quer- und 265 MPa in der Längsrichtung vor. In der WEZ (1,5 bis 2 mm von der Schmelzlinie entfernt) wurden Quereigenspannungen von 180 MPa und Längseigenspannungen von 300 MPa gemessen. Bereits nach der ersten Belastungsstufe zeichnet sich ein Abbau der Eigenspannungen ab. Bei den höchsten Nennlastspannungen von 360 MPa wurden die Quereigenspannungen am Nahtübergang vollständig und die Längseigenspannungen nahezu vollständig abgebaut. Die Quereigenspannungen betragen in der WEZ etwa 0 MPa auf, die Längseigenspannungen wurden von 300 MPa auf 150 MPa reduziert. In 3 mm und 12 mm Abstand zur Schmelzlinie lagen auch nach der Belastung in der Längsrichtung Zugeigenspannungen von 150 MPa vor. Der Eigenspannungsabbau im Grundwerkstoff fällt insgesamt geringer aus.

Ergänzend zu den Eigenspannungsverläufen sind jeweils die Verläufe der Integralbreite der Röntgeninterferenzlinien dargestellt. Die Integralbreiten korrelieren mit dem Verfestigungszustand der Oberfläche (Härte) und zeigen einen für Kehlnähte charakteristischen Verlauf. Das Reinigungsstrahlen des Grundmaterials vor dem Schweißen führte zu einer Erhöhung der Versetzungsdichte im Grundwerkstoff, was sich im Vergleich zu erwärmten Werkstoffbereichen durch das Schweißen (Nahtübergang und WEZ) in einer erhöhten Integralbreite widerspiegelt.

Quasi-statischer Eigenspannungsabbau

Werkstoff: S355J2+N

Probe: Längssteife, konv., 10 mm, Schweißzustand

Belastung: Axial, Zug

Draufsicht Längssteife

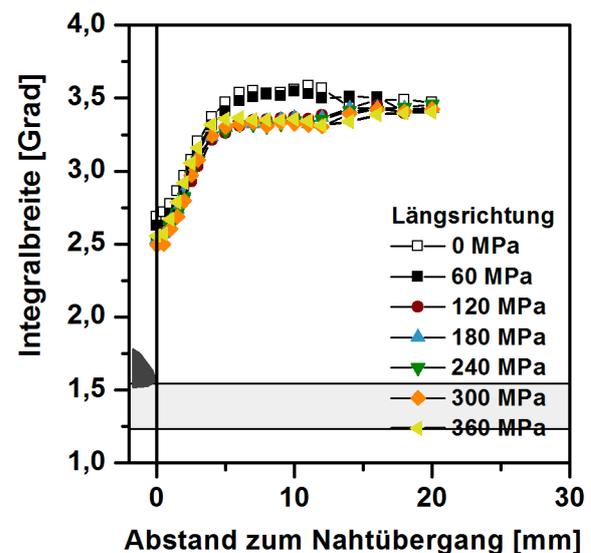
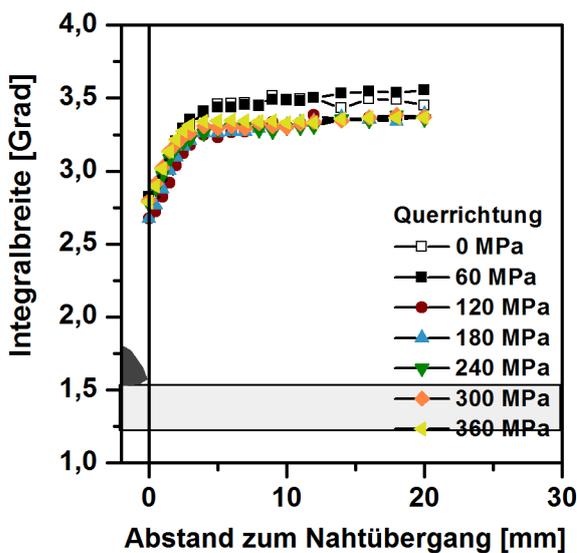
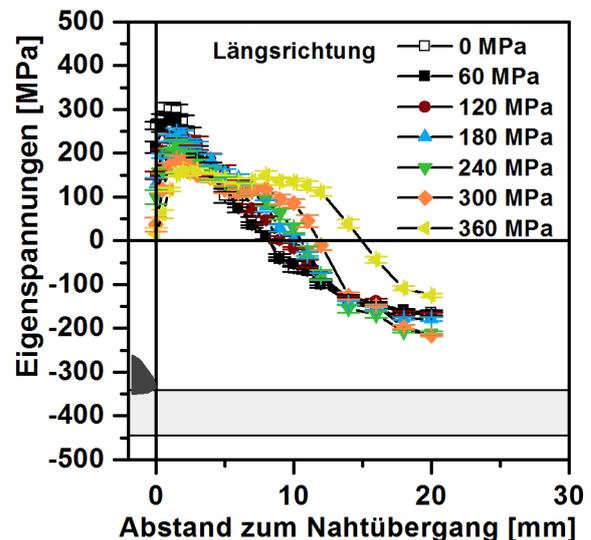
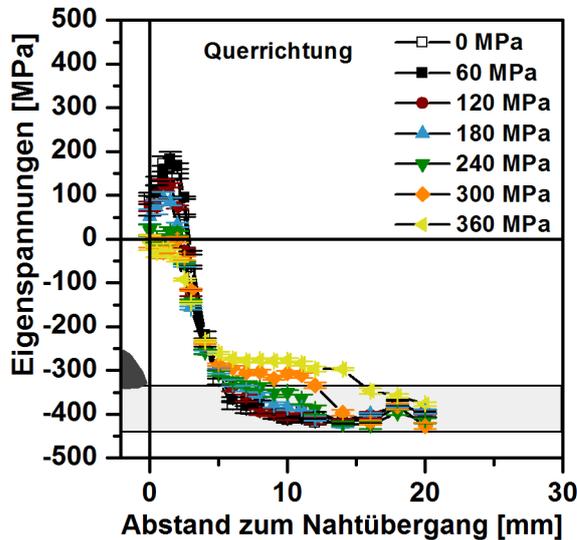
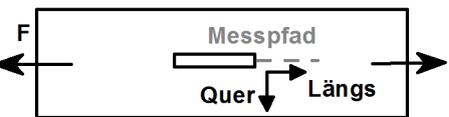


Abbildung 115 Eigenspannungs- (oben) und Integralbreitenverläufe (unten) an einer Längssteife (S355J2+N; konv.) unter Zugbeanspruchung bei unterschiedlichen Belastungen

7.7.1.2 Untersuchungen an Längssteifen aus S355J2+N (LTT)

Residual stress relaxation in longitudinal stiffeners S355J2+N (LTT)

Die Ergebnisse des quasi-statischen Eigenspannungsabbaus der LTT-geschweißten Proben aus S355J2+N sind Abbildung 116 zu entnehmen. Die Quer- und Längseigenspannungen im Ausgangszustand zeigen einen charakteristischen Verlauf, wie bereits zuvor beschrieben. Im Nahtübergang wurden 200 MPa in der Quer- und -50 MPa in der Längsrichtung gemessen. Mit steigender Lastspannung wurden Quereigenspan-

nungen bis auf 60 MPa abgebaut. In der WEZ liegen im Ausgangszustand Zugeigenspannungen von etwa 350 MPa vor. Bis zu einer Last von 240 MPa wurde ein allmähliches Abbauverhalten festgestellt. Erst bei höheren Belastungen von 300 MPa und 360 MPa wurden die Quereigenspannungen in der WEZ bis auf weniger als 50 MPa abgebaut. In weiterem Verlauf sind die Quereigenspannungen weitestgehend stabil. Die Druckeigenspannungen im Grundwerkstoff (zwischen 10 bis 20 mm Abstand zum Nahtübergang) verringern sich, erst nach Aufbringen von Nennlastspannungen von 360 MPa, von -450 MPa auf -200 MPa. Der Längseigenspannungsverlauf zeigt am Nahtübergang einen Abbau der Druckeigenspannungen von -50 MPa auf 0 MPa. Im weiteren Verlauf sind die Längseigenspannungen in der WEZ (ca. 3-4 mm vom Schweißnahtübergang) bis einer Last von 180 MPa unverändert. Mit zunehmender Lastspannung wurden die Zugeigenspannungen größer. Sie überschritten bei einer Nennlastspannung von 360 MPa Zugeigenspannungen 200 MPa. In einem Abstand zwischen 10 bis 15 mm von der Schmelzlinie wurden Druckeigenspannungen von -250 MPa (im Ausgangszustand) bis zum Erreichen einer Last von 300 MPa vollständig abgebaut. Bei 360 MPa Zugbelastung wurden Zugeigenspannungen von 200 MPa erreicht. Im Grundwerkstoff bleiben die Druckeigenspannungen von bis -350 MPa in gesamtem Belastungsintervall unverändert.

Der Verlauf der Integralbreiten in Quer- und Längsrichtung zeigt am Nahtübergang Beiträge von 2,75 Grad, die in der WEZ auf 2,5 Grad abfallen. Im weiteren Verlauf nehmen die Integralbreiten zu und weisen im Grundwerkstoff Werte von 3,75 Grad vor. Bis zum Erreichen der maximalen Belastung von 360 MPa zeigen die Integralbreiten keinen signifikanten Abbau.

7.7.1.3 Untersuchungen an Längssteifen aus S960Q (LTT)

Residual stress relaxation in longitudinal stiffeners S960Q (LTT)

Die Untersuchungen der Eigenspannungsstabilität unter Zugbeanspruchung beschränken sich beim Stahl S960QL auf Proben, die mit LTT-Zusatz geschweißt wurden, Abbildung 117. Im Ausgangszustand wurden in Querrichtung am Nahtübergang Zugeigenspannungen in Höhe von 315 MPa gemessen, in Längsrichtung sind die Eigenspannungen am Nahtübergang nahe Null. Die Quereigenspannungen in der WEZ der unbelasteten Probe weisen einen Betrag um 330 MPa auf, und die Längseigenspannungen betragen um -100 MPa. Im Grundwerkstoff (ab einem Abstand zwischen 5 bis 20 mm zum Nahtübergang) wurden im Ausgangszustand Druckeigenspannungen bis -400 MPa in der Quer- und bis -320 MPa in der Längsrichtung gemessen. In gesamtem Verlauf bleiben die Eigenspannungen sowohl in der Quer- als auch in der Längsrichtung weitestgehend stabil. Die Veränderungen der Eigenspannungen sind geringer als 20 MPa, d.h. der Eigenspannungsabbau ist etwa so groß wie der Streuband der Messungen.

Der Verlauf der Integralbreite der Röntgeninterferenzlinien zeigt auf der Messstrecke keine signifikanten Veränderungen. Ab einer Last von 250 MPa wurde eine Zunahme der Integralbreitenbeiträge um 0,2 Grad in der Quer- und in der Längsrichtung beobachtet.

Quasi-statischer Eigenspannungsabbau

Werkstoff: S355J2+N

Probe: Längssteife, LTT, 10 mm, Schweißzustand

Belastung: Axial, Zug

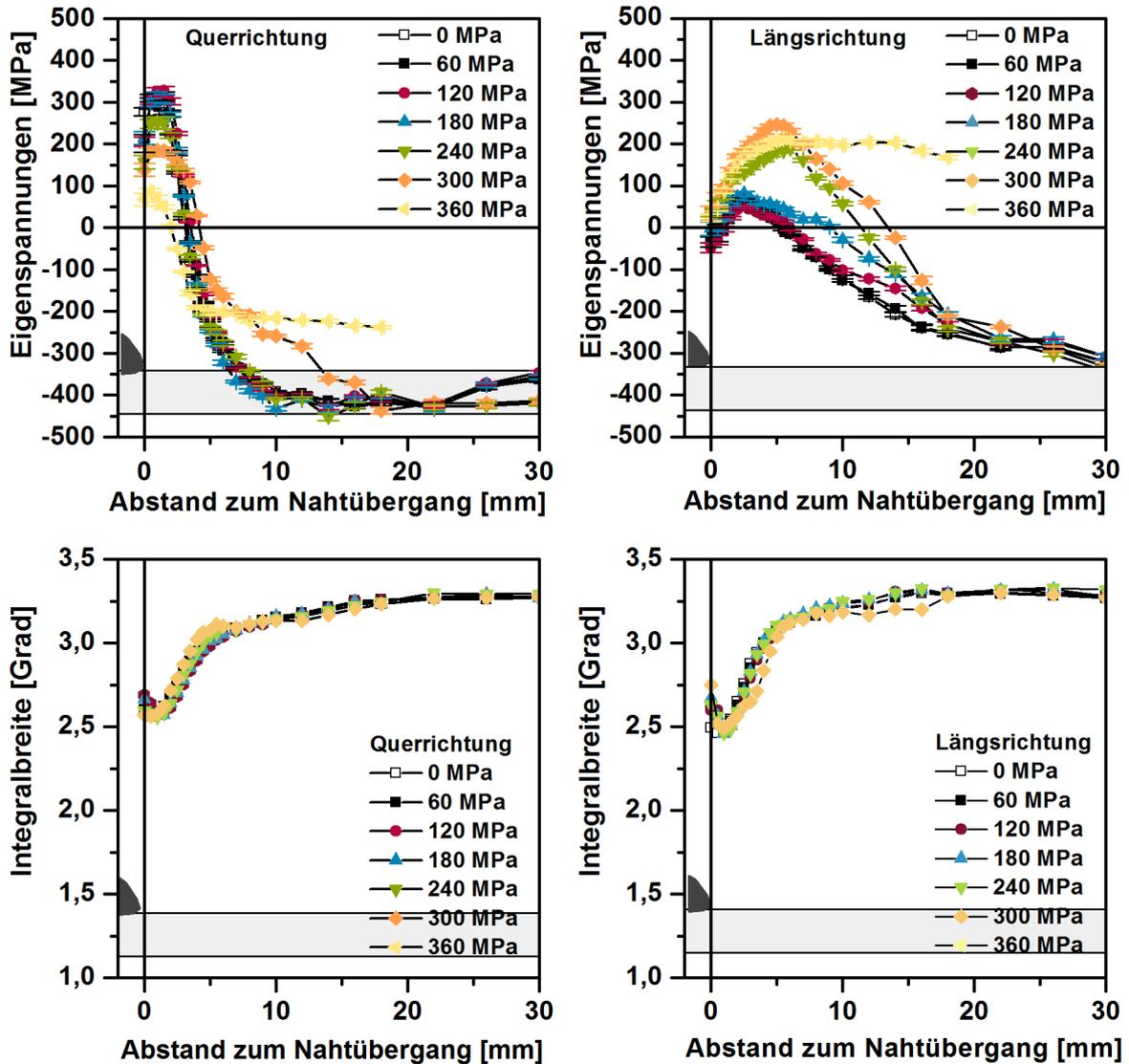
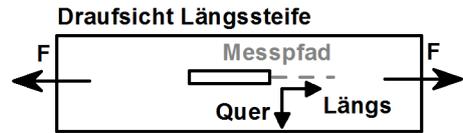


Abbildung 116 Eigenspannungs- (oben) und Integralbreitenverläufe (unten) an einer Längssteife (S355J2+N; LTT) unter Zugbeanspruchung bei unterschiedlichen Belastungen

Quasi-statischer Eigenspannungsabbau

Werkstoff: S960Q

Probe: Längssteife, LTT, 10 mm, Schweißzustand

Belastung: Axial, Zug

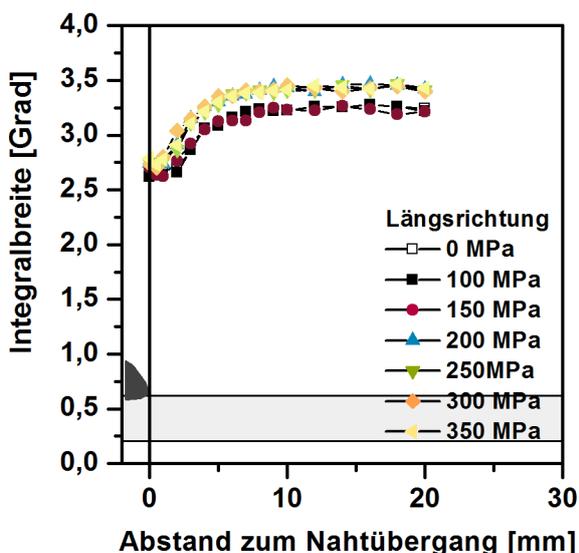
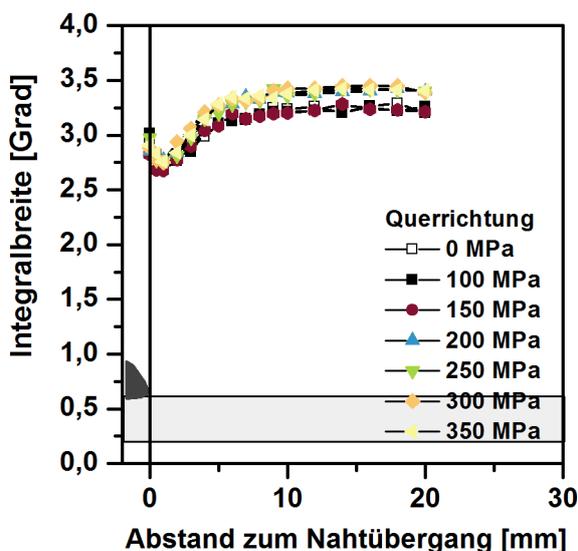
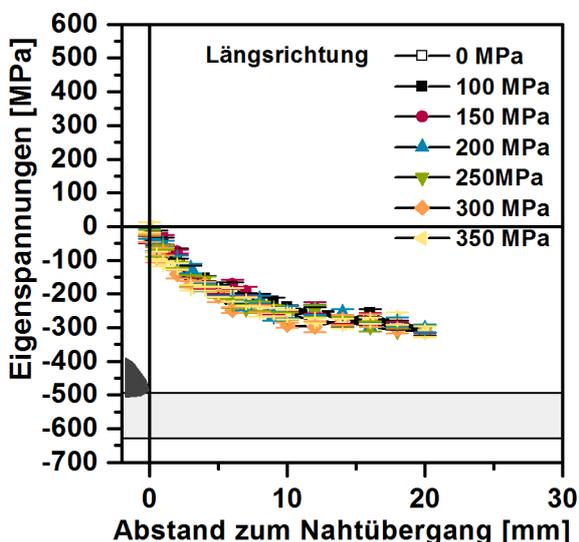
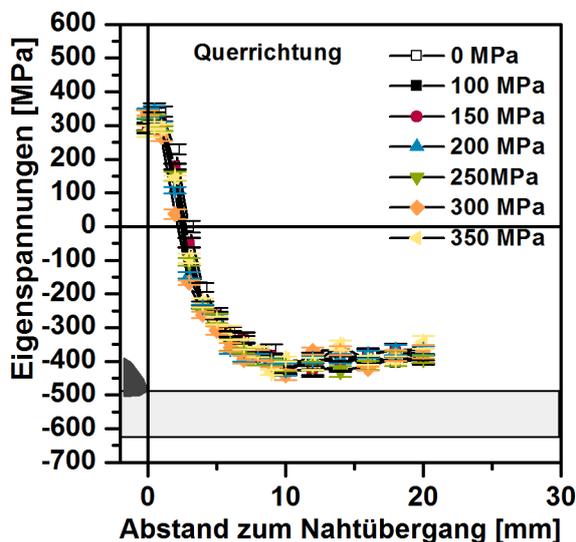
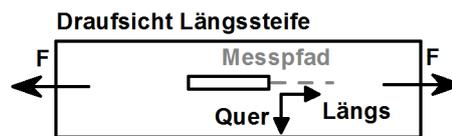


Abbildung 117 Eigenspannungs- (oben) und Integralbreitenverläufe (unten) an einer Längssteife (S960QL; LTT) unter Zugbeanspruchung bei unterschiedlichen Belastungen

7.7.2 Zyklischer Eigenspannungsabbau
Cyclic residual stress relaxation

Ergänzend zum Eigenspannungsverhalten in Folge einsinniger Zugbeanspruchungen wurde der Eigenspannungsabbau unter zyklischer Beanspruchung untersucht. Diese Untersuchungen erfolgten an mit LTT-Zusatz geschweißten Proben aus S355J2+N und S960Q.

Die zyklische Beanspruchung erfolgte unter Variation der Oberspannung beim Spannungsverhältnis $R = 0,1$. Die Beanspruchungsniveaus wurden aus den experimentell ermittelten Wöhlerlinien abgeleitet.

Abbildung 118 zeigt die Ergebnisse des zyklischen Eigenspannungsabbaus einer Längssteife aus S355J2+N im Schweißzustand sowie nach dem 1, nach 10, nach 1.000 und nach 100.000 Lastwechseln unter einer Beanspruchung $\sigma_o = 160$ MPa ($R=0,1$). Die Messungen beschränkten sich auf die Längsrichtung (Beanspruchungsrichtung). Im Ausgangszustand lagen am Nahtübergang Eigenspannungen von ca. 50 MPa vor. In der WEZ betragen die Eigenspannungen ca. 120 MPa und im Grundwerkstoff -250 MPa. Am Nahtübergang wurden nach 10.000 Lastwechsel Eigenspannungen nahe 0 MPa gemessen. In der WEZ und im weiteren Verlauf bis ca. 12 mm Abstand zum Nahtübergang erhöhen sich die Eigenspannungen leicht. Im Grundwerkstoff ca. 20 mm zum Nahtübergang verringern sich die Druckeigenspannungen ebenfalls geringfügig. Hier wurden nach 10.000 Lastwechsel Druckeigenspannungen von -250 MPa auf -200 MPa reduziert. Der Verlauf der Integralbreite (Abbildung rechts) zeigt keine nennenswerte Veränderung auf. Weitestgehend sind die Eigenspannungen unter dieser zyklischen Beanspruchung stabil.

Eine Erhöhung der Beanspruchung auf $\sigma_o = 260$ MPa führte zu tendenziell ähnlichem Abbauverhalten, Abbildung 119. Es waren im Ausgangszustand am Nahtübergang Eigenspannungen i.H.v. 100 MPa bzw. ca. 150 MPa in der WEZ vorhanden. Nach 10.000 Lastwechseln wurden die Eigenspannungen am Nahtübergang reduziert und in der WEZ auf ca. 200 MPa erhöht. Der Verlauf der Integralbreiten zeigen auf der gesamten Messstrecke keine signifikanten Veränderungen. Ab einem Abstand von 10 mm zum Nahtübergang verringern sich die Integralbreitenwerte um ca. 0,2 Grad.

Abbildung 120 zeigt den Eigenspannungsabbau einer LTT-geschweißten Längssteife aus S960Q. Die Last wurde ebenfalls als reine Zugschwellbeanspruchung ($R=0,1$) mit einer Oberspannung $\sigma_o = 400$ MPa aufgebracht. Die Messungen wurden im Ausgangszustand sowie nach 1, 10, 1.000 und 100.000 Lastspielzahlen durchgeführt. Am Nahtübergang betragen die Ausgangseigenspannungen ca. 400 MPa und fielen mit zunehmender Entfernung zum Nahtübergang relativ schnell ab. Im Grundwerkstoff wurden Druckeigenspannungen von -400 MPa gemessen. Nach der Beanspruchung bis 100.000 Lastspielzahlen wurden keinen merklichen Eigenspannungsabbau festgestellt. In Längsrichtung wurden an unbelasteter Probe auf der gesamten Messstrecke Druckeigenspannungen ermittelt. Die Druckeigenspannungen weisen am Nahtübergang Werte von -60 MPa und im Grundwerkstoff um -300 MPa auf. Auch in Längsrichtung wurde keine nennenswerte Veränderung der Eigenspannungen beobachtet.

Zusammenfassend wurde maßgeblicher Eigenspannungsabbau im Zuge der Erstbeanspruchung festgestellt. Eigenspannungsabbau am Nahtübergang ist auf die Kerbwirkung zurückzuführen.

Zyklischer Eigenspannungsabbau

Werkstoff: S355J2+N

Probe: Längssteife, LTT, 10 mm, Schweißzustand

Belastung: zyklisch, $\sigma_o = 160$ MPa, R=0,1

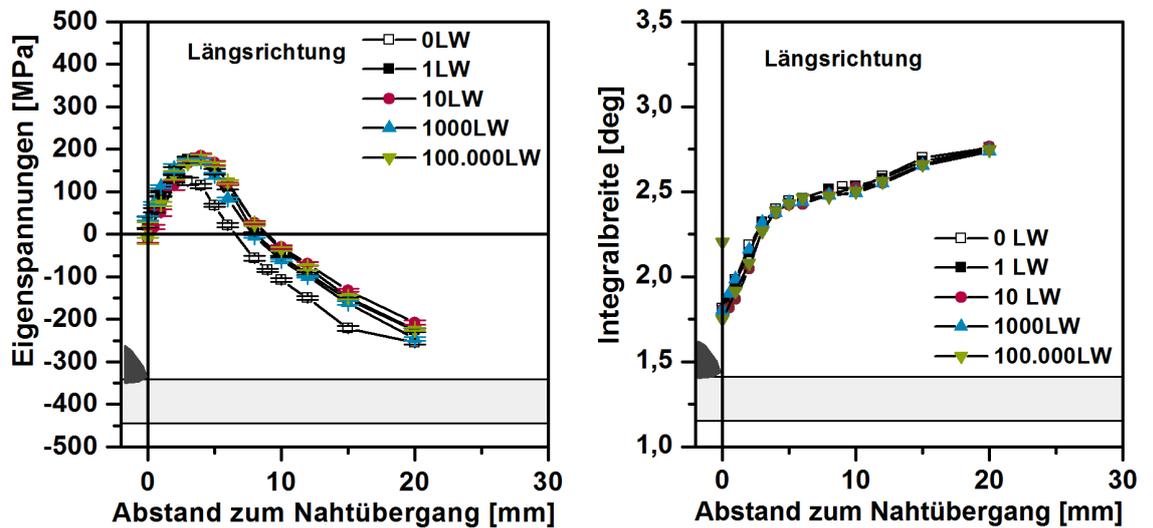


Abbildung 118 Zyklischer Eigenspannungsabbau an einer Längssteife (S355J2+N; LTT) unter der Beanspruchung R=0,1, $\sigma_o = 160$ MPa

Zyklischer Eigenspannungsabbau

Werkstoff: S355J2+N

Probe: Längssteife, LTT, 10 mm, Schweißzustand

Belastung: zyklisch, $\sigma_o = 260$ MPa, R=0,1

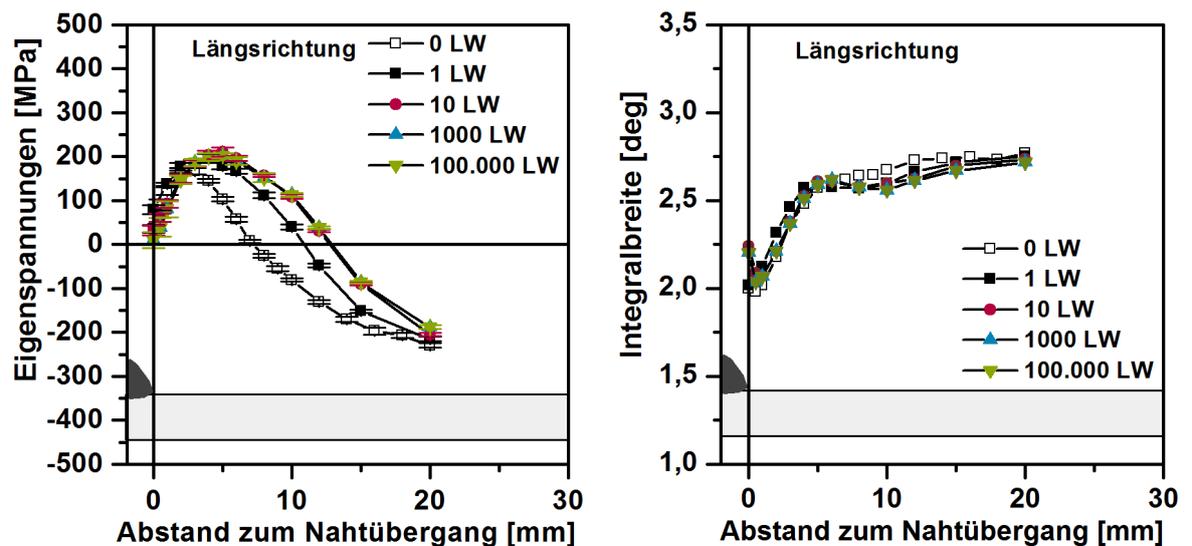


Abbildung 119 Zyklischer Eigenspannungsabbau an einer Längssteife (S355J2+N; LTT) unter der Beanspruchung R=0,1, $\sigma_o = 260$ MPa

Zyklischer Eigenspannungsabbau

Werkstoff: S960Q

Probe: Längssteife, LTT, 10 mm, Schweißzustand

Belastung: Zyklisch, $r=0,1$, $\sigma_o=400$ MPa

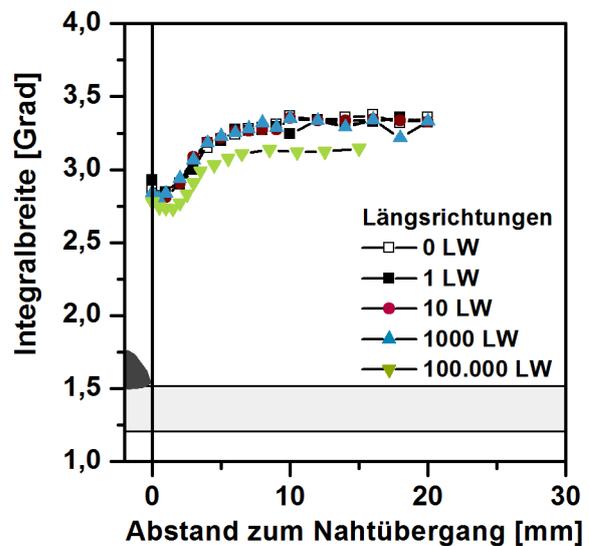
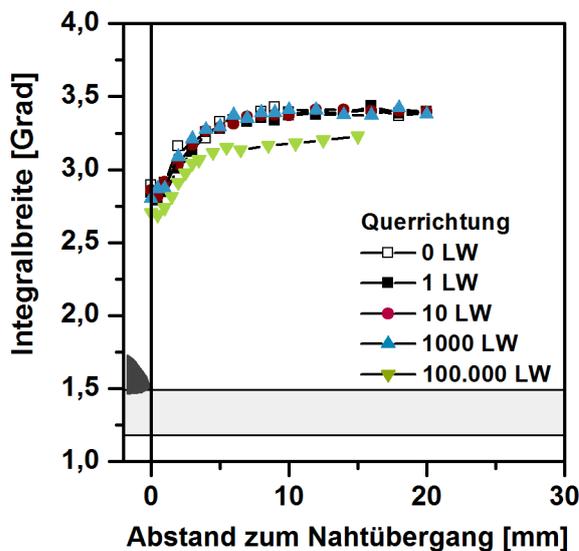
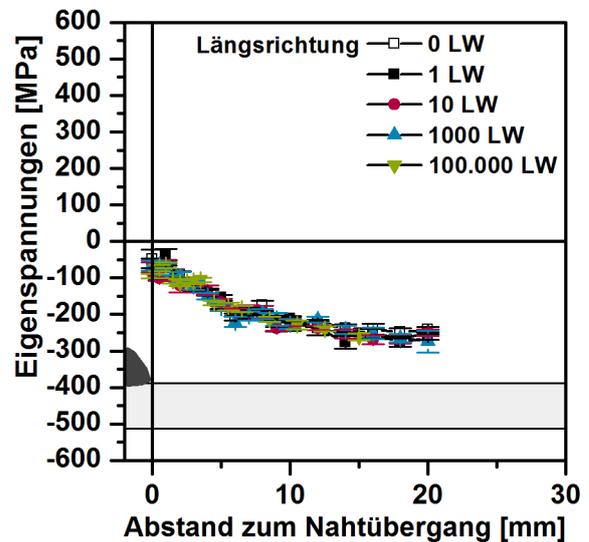
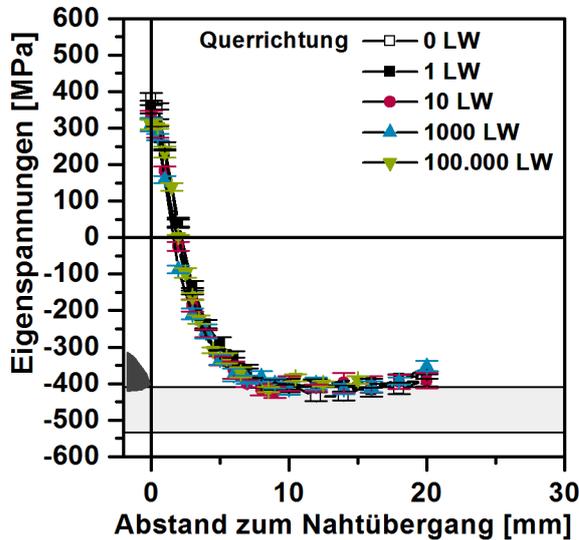
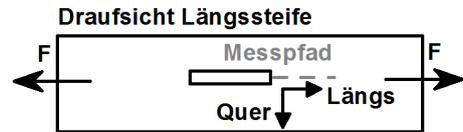


Abbildung 120 Zyklischer Eigenspannungsabbau an einer Längssteife (S690QL; LTT) unter der Beanspruchung $R=0,1$, $\sigma_o = 400$ MPa

7.8 Eigenspannungsbewertung

Evaluation of residual stress effects

7.8.1 Stumpfstöße

Stumpfstöße mit V-Naht versagen im Schwingversuch von der Schweißnahtwurzel. Die Eigenspannungen in Beanspruchungsrichtung (Quereigenspannungen) sind bei den drei Versuchsreihen in Abbildung 65, Abbildung 86 und Abbildung 99 gezeigt. Es liegen am Nahtübergang einheitlich Druckeigenspannungen vor, beim S355J2+N fallen diese betragsmäßig höher aus als beim S960Q. Der LTT-Zusatzwerkstoff hat bei dieser Verbindung keinen signifikanten Effekt auf die röntgenografisch nachweisbaren Eigenspannungen. Die Härte an der Wurzelkerbe (WEZ) ist bei Proben aus S355J2+N etwa vergleichbar (konventionell geschweißt bis 250 HV1, LTT-geschweißt bis 225 HV1) und beim S960Q merklich höher (LTT-geschweißt bis 400 HV1). Die Härte der LTT-Schweißnaht ist bei beiden Werkstoffen vergleichbar. Die Flankenwinkel am Nahtübergang sind bei beiden Werkstoffen und den verwendeten Zusatzwerkstoffen vergleichbar. An der Nahtwurzel sind die Flankenwinkel der Proben aus S960Q steiler. Die nachgewiesene Schwingfestigkeitserhöhung (Abbildung 59 und Abbildung 60) durch Verwendung des LTT-Werkstoffes kann demzufolge nicht allein mit Eigenspannungen erklärt werden. Der Werkstoffzustand sowie die Kerbwirkung (Wirkumgebung der Eigenspannungen) spielt hier eine wesentliche Rolle. Die im Ausgangszustand höheren Druckeigenspannungen im S355J2+N wirken in einem weicheren Werkstoffzustand als die niedrigeren Druckeigenspannungen im S960Q.

Stumpfstöße mit DY-Naht zeigen Versagen sowohl von der Nahtwurzel als auch von der Nahtübergangskerbe. Die Unterschiede der Schwingfestigkeit (Abbildung 59 und Abbildung 60) begründen sich hauptsächlich in der Variation der Anrissorte. Versagen vom Nahtübergang wirkt hierbei positiv und wurde mehrheitlich bei konventionell geschweißten Verbindungen beobachtet, obwohl die unverschweißte Wurzelkerbe vergleichbar ist mit der von LTT-geschweißten Verbindungen. Ein positiver Effekt (eigenspannungs- oder härtebedingt) des LTT-Zusatzwerkstoffes oder des hochfesten Werkstoffes S960Q wird nicht beobachtet.

Die LTT-geschweißten Stumpfnähte mit anschließender Schweißnahtnachbehandlung weisen im Vergleich zu den Schweißzuständen wesentlich höhere Schwingfestigkeiten auf, Abbildung 61. Dies kann bei den HFMI-behandelten Proben mit einer kombinierten Wirkung der erzeugten Druckeigenspannungen, der lokalen Kaltverfestigung und der positiven Beeinflussung des Kerbradius erklärt werden. Die WIG-Nachbehandlung bewirkt ebenfalls eine Schwingfestigkeitserhöhung, allerdings nicht so erfolgreich wie die Hämmerbehandlung. Hierbei wird die Kerbwirkung zwar deutlich reduziert, es werden aber auch teilweise Zugeigenspannungen erzeugt.

7.8.2 Kreuzstöße

Kreuzstöße (HV-Naht) versagen im Schwingversuch ebenfalls von der Nahtwurzel. Die Quereigenspannungen sind bei den Werkstoffen S355J2+N und S960Q mit und ohne LTT-Zusatzwerkstoff vergleichbar (Abbildung 70, Abbildung 71, Abbildung 81, Abbildung 82, Abbildung 91, Abbildung 92, Abbildung 104 und Abbildung 105). Die Höchstwerte betragen zwischen 100 MPa und -100 MPa. Die Härte ist vergleichbar zu den

untersuchten Stumpfnähten. Der Unterschied in der nachgewiesenen Schwingfestigkeit (Abbildung 59 und Abbildung 60) begründet sich in der flachen Neigung der konventionell geschweißten Kreuzstöße. Ein positiver LTT-Effekt ist nicht nachweisbar.

7.8.3 Überlappstöße

Die Schwingfestigkeit der Überlappstöße wird durch Verwendung des LTT-Zusatzwerkstoffes bei einseitiger Ausführung mit Nahtwurzelsversagen nicht und bei beidseitiger Ausführung mit Nahtübergangsversagen positiv beeinflusst, Abbildung 58. Die Eigenspannungen in Querrichtung am Nahtübergang werden durch den LTT-Zusatzwerkstoff nicht beeinflusst (Abbildung 73, Abbildung 74, Abbildung 83, Abbildung 84, Abbildung 93, Abbildung 94, Abbildung 107 und Abbildung 108). Es werden Werte zwischen 0 MPa und -50 MPa (S355J2+N konventionell und S960Q LTT) bzw. zwischen -100 MPa und -200 MPa (S355J2+N LTT und S960Q konventionell) nachgewiesen. Auch die Härte am Ort des Schwinganrisses (Nahtübergang / WEZ) ist bei den Probenreihen der jeweiligen Werkstoffe vergleichbar. Der Unterschied kann nicht mit der nur leicht variierenden Nahtgeometrie erklärt werden.

7.8.4 Längssteife

Die Längssteife bildet als einzige der untersuchten Stoßformen aufgrund ihrer selbst-einspannenden Wirkung im konventionell geschweißten Zustand merkliche Zugeigenspannungen in Beanspruchungsrichtung am Nahtübergang sowie der WEZ aus, Abbildung 75 und Abbildung 76. Die Eigenspannungen betragen zwischen 50 MPa und 150 MPa am Nahtübergang bzw. bis 400 MPa in der WEZ. Durch die Verwendung des LTT-Zusatzwerkstoffes werden am Nahtübergang Druckeigenspannungen von etwa -50 MPa (S355J2+N) bzw. geringe Zugeigenspannungen bis maximal 50 MPa erzeugt, Abbildung 96, Abbildung 97, Abbildung 109 und Abbildung 110. In der WEZ der LTT-geschweißten Längssteifen sind die Zugeigenspannungen mit Beträgen bis etwa 100 MPa ebenfalls geringer. Dies wird ebenfalls mit der selbst-einspannenden Wirkung der Probenform erklärt. Das Grundblech weist beim Schweißen der Längskehlnähte relativ kalte Bereiche links und rechts der Steife auf, die eine freie Ausdehnung und Schrumpfung während des Wärmezyklus behindern. Diese Ausdehnung findet bei den linienförmigen Verbindungen relativ ungehindert statt.

Der Schwingfestigkeitsanstieg kann bei dieser Probenform daher zumindest teilweise durch den positiv beeinflussten Eigenspannungszustand erklärt werden, da Härte und Kerbschärfe bei den Probenserien vergleichbar sind.

8 Zusammenfassung Summary

Untersuchungen zur Schweißbeignung unterschiedlicher LTT-Zusatzwerkstoffe machten deutlich, dass ein sicherer Einsatz in dem für hochfeste Stähle zur Verfügung stehenden Arbeitsfenster (Wärmeführung) möglich ist. Der verwendete LTT-Zusatz auf Cr-Ni-Basis lässt sich mit angepassten Schweißkennlinien im MAG-(Puls-)Prozess mit hoher Nahtgüte fügen. Unter Verwendung kohlenstoffdioxidreicher Schutzgase ist eine sehr gute Prozessstabilität gewährleistet. Auch die mechanischen Eigenschaften erlauben den Einsatz im Bereich hochfester Stähle mit einer Streckgrenze von 960 MPa. Einschränkend ist hier die Zähigkeit zu nennen. Die Kerbschlagwerte des LTT-Zusatzes erreichen zum jetzigen Entwicklungsstand nicht das Niveau konventioneller Zusatzwerkstoffe vergleichbarer Festigkeit. Die Schutzgasauswahl kann sich hier positiv auswirken. Im Verlauf der Untersuchungen wurden keine Kaltrisse gefunden. Der LTT-Zusatz wurde zudem als heißrisssicher (MVT-Test) eingestuft. Das Gefüge ist unabhängig von der betrachteten Nahtgeometrie homogen martensitisch, ohne messbaren Restaustenitanteil. Die Verteilung der Hauptlegierungselemente Chrom und Nickel im Schweißgut ist örtlichen Schwankungen aufgrund von Mikroseigerungen und Abbrand (Chrom) unterworfen. Dennoch kann praktisch im gesamten Schweißgut von entsprechend niedrigen Umwandlungstemperaturen ausgegangen werden. Der Effekt der martensitischen Phasenumwandlung kann somit im gesamten Schweißgut zum Tragen kommen.

Der örtliche Einsatz des LTT-Zusatzwerkstoffes im Bereich der Decklage einer sonst mit konventionellem Zusatz ausgeführten Mehrlagenschweißverbindung unter konstruktiver Schrumpfbehinderung bestätigte zudem die lokale Wirksamkeit des LTT-Konzepts. In den betreffenden Raupen der Schweißnaht lag ein martensitisch homogenes Gefüge mit entsprechend niedrigen Umwandlungstemperaturen vor. Leichte Anlasseffekte im wiedererwärmten Schweißgut wirkten sich diesbezüglich nicht negativ aus. Der spannungsabbauende Effekt der Martensitumwandlung zeigt sich in einer leichten Reduktion der unter Schrumpfbehinderung auftretenden Reaktionsspannungen gegenüber einer konventionell ausgeführten Verbindung. Die Eigenspannungen im LTT-Schweißgut sind örtlich richtungsabhängig gegenüber dem konventionellen Schweißgut reduziert. Die angestrebten hohen Druckeigenspannungen finden sich jedoch vornehmlich im Schweißgutinnern. Angrenzende Bereiche (WEZ) lassen in der untersuchten Stoßform keinen signifikanten Einfluss der Martensitumwandlung auf die Eigenspannungen erkennen.

Der verwendete LTT-Zusatzwerkstoff ist somit hinsichtlich des Einsatzes zum Fügen hochfester Stähle prinzipiell geeignet. Entwicklungspotential gibt es lediglich hinsichtlich der Zähigkeit. Die in dieser Arbeit erreichten Kerbschlagwerte liegen deutlich unter denen kommerziell verfügbarer konventioneller Schweißgüter. Dennoch ist ein Einsatz des LTT-Zusatzes als zusätzlich aufgebrachte Lage empfehlenswert. Die Integrität der Schweißverbindung wird hierbei nicht durch die geringe Zähigkeit gefährdet.

Eine generell positive Wirkung des LTT-Zusatzwerkstoffes im Hinblick auf die Schwingfestigkeit kann nicht bestätigt werden. Teilweise ist eine Steigerung der Schwingfestigkeit bei Substitution konventioneller Zusatzwerkstoffe zu beobachten, allerdings gelingt es nicht, die positive Wirkung zu verallgemeinern.

9 Ausblick Perspective

Das Forschungsprojekt „Schwingfestigkeitsverbesserung hochfester Schweißverbindungen mit Hilfe neuartiger LTT-Zusatzwerkstoffe“ lieferte wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der beim Schweißen mit LTT-Zusatzwerkstoffen auftretenden Eigenspannungen und der damit zu erwartenden Schwingfestigkeitsbeeinflussung. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen ergaben sich neue Fragestellungen, die es gilt in zukünftigen Projekten zu klären.

Hinsichtlich der Schweißbarkeit der LTT-Zusätze muss untersucht werden, wie die Zähigkeit der Werkstoffe erhöht werden kann. Erst dann ist der sicherere Einsatz beim Fügen hochfester Stähle gewährleistet. In diesem Zusammenhang ist der Frage nachzugehen, ob neben dem etablierten Cr-Ni-Legierungskonzept alternative chemische Zusammensetzungen, etwa mit Mn, zielführend sind. Dabei spielt auch das Seigerungsverhalten in Abhängigkeit der gewählten Schweißparameter bzw. der Stoßform eine wichtige Rolle. Insbesondere beim Einsatz des LTT-Zusatzes im Wurzelbereich muss die chemische Entmischung bzw. das Abbrandverhalten untersucht werden. Auch der Einsatz alternativer/spezieller Schutzgase zur Sicherstellung hoher mechanischer Gütewerte sollte Gegenstand zukünftiger Forschungsprojekte sein. Großes Potential zeigt sich bezüglich des Einsatzes der LTT-Werkstoffe als zusätzlich aufgebrachte Lage im schwingbruchkritischen Bereich bestehender konventioneller Schweißverbindungen, wie das Beispiel Längssteife zeigt. Hier kommt der Nachteil der geringen Zähigkeit nicht oder nur eingeschränkt zum Tragen. Zukünftige Studien sollten gezielt darauf ausgerichtet werden, speziell den nachträglichen LTT-Einsatz an entsprechenden Verbindungen bzw. Bauteilen zu untersuchen.

Zur weiteren Absicherung der schwingfestigkeitssteigernden Wirkung des LTT-Zusatzwerkstoffes müssen vermehrt Versuche an großmaßstäblichen Bauteilen erfolgen. Diese ermöglichen aufgrund der inhärenten Dehnsteifigkeit die Ausbildung von Druckeigenspannungen infolge Umwandlung während der Abkühlungsphase. Damit kann es gelingen, die grundlegenden hier beobachteten positiven Effekte auf die Schwingfestigkeit weiter zu belegen.

10 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen List of publications related to the project

Bereits veröffentlichte Dokumente:

Beitrag DVS Congress 2018:

*Schwingfestigkeitsverbesserung hochfester Schweißverbindungen mit Hilfe neuartiger
LTT-Zusatzwerkstoffe,*

Schweißtechnische Verarbeitung - A. Kromm, J. Dixneit, T. Kannengießer, Berlin

Schwingfestigkeitsuntersuchungen - J. Hensel, H. Eslami, T. Nitschke-Pagel, K. Dilger,
Braunschweig

Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Veröffentlichung von Teilergebnissen im Rahmen des IWW Annual Assembly 2019
- Veröffentlichung von Teilergebnissen in der Zeitschrift „Welding in the World“
- Veröffentlichung von Teilergebnissen in der Zeitschrift „International Journal of Fatigue“
- Veröffentlichung einer Ergebniszusammenfassung in der Zeitschrift „Stahlbau“

11 Ergebnistransfer in die Wirtschaft Transfer to economy

Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum nach Projektstart	Status
Maßnahme A: Veröffentlichung der Ergebnisse	Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachzeitschriften und auf Konferenzen	A2 Beitrag „DVS Congress“	DVS-Congress Sept. 2018	erfolgt
		A5 Beitrag auf dem Intermediate Meeting der Com. XIII „Fatigue of welded components and structures“	Intermediate Meeting der C. XIII 15.-17.03.2017	erfolgt
		A6 Beitrag in „Welding in the World“	innerhalb der Laufzeit	in Vorbereitung
Maßnahme B: Ergebnistransfer in die akademische Ausbildung	Transfer der Forschungsergebnisse in die akademische Ausbildung	B1 Einbindung studentischer Hilfskräfte	innerhalb der Laufzeit	erfolgt
		B2 Vergabe von Studien- bzw. Diplomarbeiten zu Teilbereichen des Themas	innerhalb der Laufzeit	erfolgt, stud. Hilfskraft (BAM, TU Braunschweig)
		B3 Lehrveranstaltungen an der OvGU-Magdeburg IWF und am ifs TU Braunschweig	innerhalb der Laufzeit	erfolgt
Maßnahme C: Ergebnistransfer in die Industrie	zeitnahe und direkte Weitergabe/Nutzung der Ergebnisse in der Industrie	C1 Vorträge auf den Sitzungen der DVS-Ausschüsse: Arbeitsgruppe Q1 Konstruktion und Berechnung und Q4 Prüfen von Schweißungen	innerhalb der Laufzeit	erfolgt

Maßnahme D: Projekt begleitender Ausschuss	Diskussion der Ergebnisse und Abgleich mit den Anforderungen der Industrie	D1 Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten	1-2 Monate	erfolgt
		D2 Vorstellung der ersten erzielten Ergebnisse und Diskussion der weiteren Vorgehensweise	6 Monate	erfolgt
		D3 Vorstellung weiterer erzielter Ergebnisse und Diskussion der weiteren Vorgehensweise	1 Jahr	erfolgt
		D4 Vorstellung weiterer erzielter Ergebnisse und Diskussion der weiteren Vorgehensweise	1½ Jahre	erfolgt
	Diskussion der Ergebnisse und Abgleich mit den Anforderungen der Industrie	D5 Abschlusspräsentation und Diskussion erzielter Ergebnisse	April 2018	erfolgt
Maßnahme E: Weiterbildung	Weiterbildung von Mitarbeitern aus KMU ohne eigene Forschungskapazitäten	E1 Vorträge bei den am Projekt beteiligten Firmen	innerhalb der Laufzeit	erfolgt bzw. in Planung 2018/2019

Maßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum nach Projektstart	Status
Maßnahme A: Veröffentlichung der Ergebnisse	Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachzeitschriften und auf Konferenzen	A1 Beitrag in Schweißen und Schneiden	4 Jahre	geplant für 2019
		A3 Beitrag auf dem IIW Annual Assembly Com. II „Arc welding and filler metal“	4 Jahre	geplant für 2019
		A4 Beitrag „Welding in the World“	4 Jahre	geplant für 2019
		A5 Beitrag auf dem IIW Annual Assembly Com. XIII „Fatigue of welded components and structures“	4 Jahre	geplant für 2019
		A6 Beitrag in „Welding in the World“	4 Jahre	geplant für 2019
Maßnahme E: Weiterbildung	Weiterbildung von Mitarbeitern aus KMU ohne eigene Forschungskapazitäten	E1 Vorträge bei den am Projekt beteiligten Firmen	innerhalb der Laufzeit und danach	erfolgt bzw. in Planung 2018/2019
Maßnahme F: Veröffentlichung der Ergebnisse	Veröffentlichung der Ergebnisse im Zuge angestrebter Promotion	F1 Beitrag zur Dissertation der wissenschaftlichen Mitarbeiter	3,5 Jahre	Dissertation eingereicht 2018
		F2 Abschlussbericht des Vorhabens	3,5 Jahre	In Arbeit
Maßnahme G: Übernahme der Ergebnisse in technische Regelwerke/ Normen	Einbringung der Forschungsergebnisse in Gremien zur Unterstützung der Arbeit für Normung	G1 Normenausschuss Eisen und Stahl (FES) DIN NA 021 Sitzungen des Normenausschusses Schweißtechnik (NAS) / NA 092 mit der Arbeitsgruppe NA 092-00-04 AA Qualitätssicherung beim Schweißen (DVS AG Q	2-4 Jahre	erfolgt/geplant

		2) und des Normenausschusses Schweißtechnik (NAS) /NA 092-00-05 GA Zerstörende Prüfen von Schweißungen (DVS AG Q4)		
		G2 IIW International Institute of Welding – Einarbeitung der Ergebnisse in entsprechende IIW-Recommendations, wie IIW-2393	3-4 Jahre	geplant
Maßnahme H: Ergebnistransfer in die Industrie	Transfer der Forschungsergebnisse über Personaltransfer in die Industrie	H1: Transfer der projektverantwortlichen Mitarbeiter in die Industrie	3-5 Jahre	geplant
Maßnahme I: Ergebnistransfer in die akademische Ausbildung	Transfer der Forschungsergebnisse in die akademische Ausbildung	I1: Lehrveranstaltungen an der OVGU-Magdeburg IWF und am ifs TU Braunschweig	kontinuierlich im Anschluss an die Laufzeit	

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten
Transferkonzepts
Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept

12 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept

Aufgrund der oben genannten vielfältigen Transfermaßnahmen in die Wirtschaft werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt.

13 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry

1. Die Ergebnisse zeigen, dass sich LTT-Zusatzwerkstoffe auf Cr-Ni-Basis mit hochfesten Stählen sicher verarbeiten lassen. Trotz hohen Legierungsgehalts sind die untersuchten Werkstoffe heißrissunanfällig. Die mechanischen Eigenschaften sind auf dem Niveau konventioneller Zusätze. Dies gilt nicht für die Zähigkeit. Die Werte konventioneller Grund- und Zusatzwerkstoffe werden im derzeitigen Entwicklungsstand nicht erreicht. Vorteilhaft wird der Einsatz nur schwach oxidierender Schutzgase eingeschätzt. Die Kerbschlagwerte ließen sich damit signifikant erhöhen.
2. Die hohe Festigkeit des Schweißgutes in Kombination mit volumenhaften Druckeigenstressungen ist vorteilhaft hinsichtlich Tragfähigkeit und Risswachstum.
3. Die Anwendung des LTT-Zusatzwerkstoffes als zusätzliche Lage ist vielversprechend, da der noch bestehende Nachteil der verminderten Zähigkeit hier von untergeordneter Rolle ist.
4. Die Eigenbeanspruchung eines geschweißten Stumpfstoßes mit mehrlagig ausgeführter V-Naht konnte mit Hilfe eines LTT-Zusatzes gegenüber einem konventionellen Zusatz leicht gesenkt werden. Es ist anzunehmen, dass andere Stoßkonfigurationen hier noch stärker vom LTT-Effekt profitieren, wie das Beispiel „Längssteife“ zeigt.
5. Im LTT-Schweißgut können volumenhafte Druckeigenstressungsfelder erzeugt werden. Dies ist mit herkömmlichen Nahtnachbehandlungsverfahren nicht möglich.
6. Die Ergebnisse lassen erwarten, dass eine erweiterte Ertüchtigung bestehender Schweißkonstruktionen hinsichtlich der Schwingfestigkeit durch nachträgliche lokale Anwendung des LTT-Zusatzes möglich ist.
7. Die sich einstellenden Eigenstressungen sind reproduzierbar hinsichtlich Niveau und Verteilung in Abhängigkeit der Stoß-/Nahtform. Dies ist ein Vorteil gegenüber stark anwenderabhängigen (manuellen) Nahtnachbehandlungsverfahren.
8. Im jetzigen Entwicklungsstand ermöglichen LTT-Zusätze eingeschränkt, d. h. als zusätzlich aufgebrauchte Lage, wirtschaftliche Vorteile durch Einsparung von Fertigungskosten (z. B. Nahtnachbehandlungs im Werk) und Wegfall der Anschaffungskosten für Nahtnachbehandlungswerkzeuge.
9. Die Ergebnisse belegen eindeutig das hohe Potential der LTT-Zusatzwerkstoffe. Damit sollten Werkstoffentwicklungen angestoßen werden, um das Defizit der niedrigen Kerbschlagarbeit zu beseitigen.

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Presentation of the scientific-technological and economical benefits

Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Arbeitspaket 1 (Schweißparameteroptimierung) durchgeführte Literaturrecherche diente der Ermittlung des aktuellen Standes der Forschung und Technik zum Thema LTT-Schweißzusatzwerkstoffe. Auf Basis dieser Recherche erfolgte die Erarbeitung der Versuchsparameter für das Arbeitspaket. Zur Qualifikation eines geeigneten LTT-Zusatzwerkstoffes wurden mehrere Chargen unterschiedlicher LTT-Legierungen hinsichtlich der Schweißbarkeit begutachtet. Als Ergebnis wurde eine auf Chrom und Nickel sowie eine auf Chrom und Mangan basierende LTT-Legierung für nachfolgende Untersuchungen ausgewählt. Es wurden Schweißkennlinien erstellt und durch High-Speed-Kamera-Aufnahmen optimiert. Anschließende Röntgendurchstrahlungsuntersuchungen der Schweißnähte dienten der Validierung in Bezug auf Schweißporen. Es konnten keine Poren festgestellt werden. Das Umwandlungsverhalten der LTT-Legierungen sowie deren mechanische Eigenschaften wurden experimentell bestimmt. Die Heißrissneigung wurde im MVT-Test geprüft. Im Anschluss erfolgte im Arbeitspaket 2 (Probenfertigung für die Schwingfestigkeitsprüfung) die Untersuchung der Schweißbarkeit zweier LTT-Zusatzwerkstoffe anhand der im Projekt festgelegten Schweißstoßkonfigurationen. Dies geschah anhand umfangreicher metallografischer rasterelektronenmikroskopischer und zerstörungsfreier Untersuchungen. Aufgrund dieser Untersuchungen wurde der Chrom-Nickel-basierte LTT-Zusatz für die Schwingfestigkeitsuntersuchungen ausgewählt. Ein Chrom-Mangan-basierter Ansatz wurde nicht weiterverfolgt. Mit Hilfe von Temperaturmessungen wurden die geforderten Abkühlbedingungen insbesondere für den Grundwerkstoff S960QL sichergestellt. Eigenspannungsmessungen an allen geschweißten Stoßformen dienten zur grundlegenden Charakterisierung der Eigenspannungen im Ausgangszustand und nach Entnahme (Wasserstrahlschneiden) der Schwingproben. Weiterhin wurden in umfangreichen Versuchen Schweißparameter zur Herstellung der LTT-Zusatzlagen an den Längssteifen im Arbeitspaket 6 (Bauteilversuch) erarbeitet. Im Rahmen der Arbeiten des Arbeitspakets 3 (Schwingfestigkeitsanalyse) wurde die Schwingfestigkeit der hergestellten Schweißproben experimentell ermittelt. Die erarbeiteten Versuchsergebnisse ermöglichen die Ableitung des Einflusses des verwendeten Schweißzusatzwerkstoffes unter Berücksichtigung der Nahtform bezüglich der erzielbaren Schwingfestigkeitssteigerungen. Es zeigte sich eine vom Grundwerkstoff und der Nahtform abhängige schwingfestigkeitssteigernde Wirkung des LTT-Zusatzwerkstoffes. Die Erkenntnisse wurden im Wesentlichen an den bauteilähnlichen Proben Längssteife (Arbeitspaket 6) bestätigt. Das Arbeitspaket 4 dient im Kern der Charakterisierung des vorliegenden Eigenspannungszustands und ist somit Grundvoraussetzung zur Interpretation aller Schwingfestigkeitsuntersuchungen. Die Eigenspannungen wurden an Schwingproben mittels zerstörungsfreier Röntgendiffraktometrie bestimmt. Darüber hinaus wurde die Eigenspannungsstabilität unter mechanischer Beanspruchung untersucht, um eindeutig zu klären, ob Eigenspannungen für zyklische Festigkeitssteigerungen von Relevanz sind. Die in Arbeitspaket 5 (Spannungsanalyse unter Einspannung) durchgeführten Versuche im 2-MN-Prüfsystem dienten der Beantwortung der Fragestellung, ob der Einsatz des LTT-Zusatzes allein in der Decklage zu einer signifikanten Reduktion der lokalen als

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der
erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und
ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Presentation of the scientific-technological and economical benefits

auch globalen Beanspruchung führt. In Ergänzung zum ursprünglich geplanten Vorgehen in AP5 und auch AP6 wurde entschieden, an Proben unterschiedlicher Naht- bzw. Blechkonfiguration umfangreiche Eigenspannungsverteilungen mittels Neutronenbeugung zu ermitteln. Die durchgeführten Untersuchungen sind für den Nachweis der positiven Wirkung der Phasenumwandlung auf die Eigenspannungen und das Verständnis der damit verbundenen Schwingfestigkeitsbeeinflussung unabdingbar.

14 Literaturverzeichnis Bibliography

- [1] H. Wegmann; P. Gerster: Schweißtechnische Verarbeitung und Anwendung hochfester Baustähle im Nutzfahrzeugbau. DVS Berichte 225, S. 429–436
- [2] http://www.stahl-info.de/medieninformationen/Archiv/pm_klimaschutz_mit_faktor_6.asp 17.10.2013.
- [3] J. Heeschen: Untersuchungen zum Dauerschwingverhalten von Schweißverbindungen aus hochfesten Baustählen unter besonderer Berücksichtigung der Eigenspannungszustandes und der Nahtgeometrie. Dissertation. Universität - Gesamthochschule Kassel, 1986
- [4] Th. Nitschke-Pagel; H. Wohlfahrt: Einfluss von Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit geschweißter Feinkornbaustähle. In: DFG-Forschungsbericht "Eigenspannungen und Verzug durch Wärmewirkung," D. Aurich, K.-H. Kloos, G. Lange, E. Macherauch (Ed.), Weinheim, WILEY-VCH, 1999, S. 291–308
- [5] W. Gundel; U. Hamme; S. Herion: Ermüdungsfestigkeit geschweißter Konstruktionen aus hoch- und höchstfesten Feinkornbaustählen in der Praxis. In: DVS Conference, 2010, S. 220–224
- [6] Th. Nitschke-Pagel; H. Wohlfahrt; K. Dilger: Application of the Local Fatigue Strength Concept for the Evaluation of Post Weld Treatments. *Welding in the World*, Vol. 51 (2007), Nr. 11-12, S. 65–75
- [7] S. Böhm; I. Hartung; K. Dilger; A. Schulz: Instandhaltung alter Stahlbauwerke. In: DVS-Berichte 267, 2010, S. 133–139
- [8] A. Kromm: Umwandlungsverhalten und Eigenspannungen beim Schweißen neuartiger LTT-Zusatzwerkstoffe. BAM-Dissertationsreihe Band 72, Berlin, 2011.
- [9] W. Wang; L. Huo; Y. Zhang; D. Wang; H. Jing: New Developed Welding Electrode for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints. *Journal Materials Science and Technology*, Vol. 18 (2002), Nr. 6, S. 527–531
- [10] A. Ohta; O. Watanabe; K. Matsuoka; C. Siga; S. Nishijima: Fatigue Strength Improvement by using newly developed Low Transformation Temperature Welding Material. *Welding in the World*, Vol. 43 (1999), Nr. 6, S. 38–42
- [11] Martinez Diez, F.: Development of Compressive Residual Stress in Structural Steel Weld Toes by Means of Weld Metal Phase Transformations. *Weld. in the World*, Vol. 52, (2008) No. 7/8, S. 63-78
- [12] Francis, J.A.; Stone, H.J.; Kundu, S.; Rogge, R.B.; Bhadeshia, H.K.D.H.; Withers, P.J.: Transformation Temperatures and Welding Residual Stresses in Ferritic Steels. Proceedings of PVP2007, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Antonio, July 22-26 2007, USA, PVP2007-26544, ASME, S. 1-8.
- [13] Blome, K.: Erhöhung der Schweissproduktivität durch den Einsatz von Fülldrähten mit erhöhtem Füllgrad. 5. Aachener Schweißtechnik-Kolloquium: Leistungs- und –Qualitätssteigerung durch weiterentwickelte Schutzgasschweißverfahren, 1997, S. 65-69

- [14] A. Ohta; N. Suzuki; Y. Maeda; S.J. Maddox: FATIGUE STRENGTH IMPROVEMENT OF LAP WELDED JOINTS BY LOW TRANSFORMATION TEMPERATURE WELDING WIRE FATIGUE STRENGTH IMPROVEMENT OF LAP WELDED JOINTS BY LOW TRANSFORMATION TEMPERATURE WELDING WIRE – SUPERIOR IMPROVEMENT WITH STRENGTH OF STEEL. *Welding in the World*, Vol. 47 (2003), Nr. 3/4, S. 38–43
- [15] A. Ohta; Y. Maeda; N. Suzuki: FATIGUE LIFE EXTENSION BY REPAIRING FATIGUE CRACKS INITIATED AROUND BOX WELDS WITH LOW TRANSFORMATION TEMPERATURE WELDING WIRE. *Welding in the World*, Vol. 5/6 (45), 2001, S. 3–8
- [16] T. Kannengiesser: Untersuchungen zur Entstehung schweißbedingter Spannungen und Verformungen bei variablen Einspannbedingungen im Bauteilschweißversuch. Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, (2000),
- [17] A. Kromm; T. Kannengiesser: Effect of martensitic phase transformation on stress build-up during multilayer welding. *Materials Science Forum*, Vol. 768-769 (2014), S. 660–667
- [18] J. Gibmeier, E. Obelode, J. Altenkirch, A. Kromm, T. Kannengießer: Residual stress in steel fusion welds joined using low transformation temperature (LTT) filler material. *Materials Science Forum*, Vols. 768-769 (2014) S. 620-627
- [19] Shiga, C.; Yasuda, H.Y.; Hiraoka, K.; Suzuki, H.: Effect of Ms temperature on residual stress in welded joints of high-strength steels. *Welding in the World*, vol. 54, no. 3/4, 2010, S. 71-79.
- [20] J. Altenkirch; J. Gibmeier; A. Kromm; T. Kannengiesser; T. Nitschke-Pagel; M. Hofmann: In situ study of structural integrity of low transformation temperature (LTT)-welds. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528 (2011), Nr. 16-17, S. 5566–5575
- [21] J. Hensel; Th. Nitschke-Pagel; K. Dilger: Eigenspannungen im Schweißzustand und quasi-statische Eigenspannungsrelaxation an geschweißten Längssteifen aus Baustählen. In: *DVS-Berichte 295*, 2013, S. 102–110
- [22] T. Boellinghaus; T. Kannengiesser; M. Neuhaus: EFFECTS OF THE STRUCTURAL RESTRAINT INTENSITY ON THE STRESS STRAIN BUILD UP IN BUTT JOINTS. In: *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7*, 2005, S. 651–669
- [23] N.N.: DIN EN 1993-1-9 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1 - 9: Ermüdung. (2010)
- [24] A. Kromm; J. Dixneit; T. Kannengiesser: Residual stress engineering by low transformation temperature alloys-state of the art and recent developments. *Welding in the World*, Vol. 58 (2014), Nr. 5, S. 729-741
- [25] A. Kromm; V. van der Mee; T. Kannengiesser; B. Kalfsbeek: Properties and weldability of modified low transformation temperature filler wires. *Welding in the World*, Vol. 59 (2015), Nr. 3, S. 413-425
- [26] W. Steven; A.G. Haynes: The Temperature of Formation of Martensite and Bainite in Low-alloy Steels. *Journal of the Iron and Steel Institute*, August (1956), S. 349-359