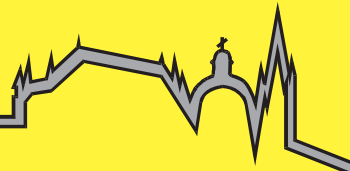


Stefan Gach

**Verzugsminderung durch Volumen-
expansion einer kontrollierten
martensitischen Phasenumwandlung
in Strahlschweißprozessen**



Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 4/2024

Shaker Verlag

**Verzugsminderung durch Volumenexpansion einer kontrollierten
martensitischen Phasenumwandlung in Strahlschweißprozessen**

**Distortion Reduction through Volume Expansion of a Controlled
Martensitic Phase Transformation in Beam Welding Processes**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Stefan Gach

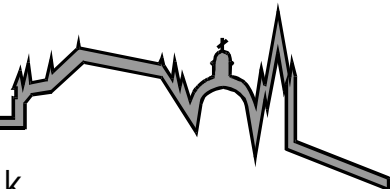
Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. habil. Thomas Kannengießer

Tag der mündlichen Prüfung: 13.06.2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Stefan Gach

**Verzugsminderung durch Volumen-
expansion einer kontrollierten
martensitischen Phasenumwandlung
in Strahlschweißprozessen**



Aachener Berichte Fügetechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 4/2024

Shaker Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2024)

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9640-8

ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Kurzfassung

Low-Transformation-Temperatur (LTT) Werkstoffe wurden als Zusatzmaterial zur Reduzierung von Zugeigenspannungen in hochfesten Feinkornbaustählen konzipiert. Sie bedienen sich des Volumenexpansionseffektes während einer martensitischen Umwandlung, die bei verringerter Temperatur einsetzt. Diese Volumenexpansion wirkt der Volumenschrumpfung, welche ursächlich für den Bauteilverzug ist, während der Abkühlung entgegen. Die positiven Effekte dieser LTT-Legierungen auf die Zugeigenspannungsbelastung wurden in verschiedenen Untersuchungen, primär im Bereich des Lichtbogenschweißens bewiesen. Durch die Zugspannungsreduktion bieten diese Werkstoffe auch das Potenzial, positiv auf den Bauteilverzug zu wirken.

Im Gegensatz zu den in der Literatur beschriebenen Lichtbogenprozessen, wo LTT-Werkstoff in Drahtform großvolumig zugegeben wird, nimmt der Zusatzwerkstoff in Strahlschweißnähten einen deutlich geringeren Anteil ein. Es erfolgt eine in-situ Legierung des LTT-Gefüges, aus Zusatzwerkstoff und Grundwerkstoff, da je nach Aufmischungsverhältnis bei einer verringerten Martensitstarttemperatur die Phasenumwandlung erfolgt.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept erarbeitet und erprobt, diese Werkstoffe mit dem Ziel der Verzugsminimierung in Strahlschweißprozessen einzusetzen. Dabei folgt die Vorgehensweise einem modularen Baukastenprinzip. Einzelne Methoden, Metallurgische, Analytische, Prozesstechnische oder Simulative werden hinsichtlich ihres Beitrages zur Beherrschung des LTT-Konzeptes untersucht. Im Zusammenspiel liefern die Methoden die Möglichkeit das LTT-Konzept im Strahlschweißen anzuwenden und in Zukunft auf komplexere Geometrien zu übertragen.

Im Ausblick erfolgt ein Beispiel eines möglichen Einsatzes des LTT-Konzeptes zur Verzugsminderung auf ein Anwendungsbeispiel im Schienenfahrzeugbau. Dabei werden die einzelnen Methoden des Baukastenprinzips extrapoliert und auf theoretischer Basis angewendet.

Abstract

Low transformation temperature (LTT) materials have been designed as additive materials to reduce tensile residual stresses in high-strength fine-grained structural steels. These materials utilize the volume expansion effect during a martensitic transformation that begins at reduced temperature. This volume expansion counteracts the volume shrinkage, which is the cause of component distortion, during cooling. The positive effects of these LTT alloys on tensile residual stress loading have been demonstrated in various investigations, primarily in the area of arc welding. Due to the reduction in tensile stress, these materials also offer the potential to have a positive effect on component distortion.

In contrast to the arc processes described in the literature, where LTT material is added in wire form in large volumes, the filler material in beam welds takes up a much smaller proportion. An in-situ alloying of the LTT structure, consisting of filler material and base material, takes place, since, depending on the filler ratio, the phase transformation takes place at a reduced martensite start temperature.

In the present work, a concept is developed and tested for using these materials in beam welding processes with the aim of minimizing distortion. The approach follows a modular design principle. Individual methods, metallurgical, analytical process engineering or simulative in nature, are examined regarding their contribution to mastering the LTT concept. In combination, the methods provide the possibility to apply the LTT concept in beam welding and to test it on more complex geometries in the future.

The outlook provides an example of a possible application of the LTT concept to minimise distortion in an example application in rail vehicle construction. The individual methods of the modular principle are extrapolated and applied on a theoretical basis.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen im Rahmen des SFB 1120 „Bauteilpräzision durch Beherrschung von Schmelze und Erstarrung in Produktionsprozessen“. Für die Förderung möchte ich mich bei der Deutschen Forschungsgesellschaft bedanken.

Bedanken möchte ich mich insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen für die Übernahme des Berichtes, sowie für die kontinuierliche Unterstützung, die zur Erstellung dieser Arbeit geführt hat. Ebenso möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Thomas Kannengießer für die Übernahme des Koreferates, sowie Herrn Prof. Marek Behr Ph.D. für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Für die Korrektur des Manuskriptes bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Lars Stein, Dr.-Ing. Simon Olschok sowie Frau Sarah Brandenburg.

Getreu des Mottos Henry Fords: *„If everyone is moving forward together, then success takes care of itself“* möchte ich mich bei allen ISF-lern für die große Unterstützung, den fachlichen Schlagabtausch und den tollen Teamgeist bedanken.

Ein besonderer Dank für Unterstützung bei der Durchführung der Versuche sowie dem wissenschaftlichen Austausch bei der Bewertung der Ergebnisse geht an die Kollegen des Sonderforschungsbereich 1120, in dessen Rahmen diese Dissertation angesiedelt ist. Namentlich zu nennen in alphabetischen Reihenfolge: Dennis Arntz, Fatma Akyel, André Häusle, Krishna Komerla, Olek Mokrov, Simon Olschok, Alexander Schwedt und Rahul Sharma.

Im Sinne Robert Bosch's *„Jede Arbeit ist wichtig, auch die kleinste. Es soll sich keiner einbilden, seine Arbeit sei über die seines Mitarbeiters erhaben. Jeder soll mitwirken zum Wohle des Ganzen.“* gilt mein Dank all den studentischen Mitarbeitern, welche bei der Durchführung der Versuche zu dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Mein größter und persönlichster Dank gilt meiner Familie. Zum einen danke ich meiner Frau, Johanna Gach. Du hast mir so viel Verständnis und moralische Unterstützung entgegengebracht, woraus ich immer wieder Kraft für neuen Tatendrang schöpfen konnte. Zum anderen bedanke ich mich bei meine Eltern Klaus und Iris Gach, dass ihr mich jederzeit auf meiner akademischen Laufbahn unterstützt habt. Euer Interesse am Gelingen dieser Arbeit hat mich stets motiviert.

Teile der gezeigten Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht:

- 2015_1 Application of low-transformation temperature (LTT) materials for stress reduction in electron beam welding - Reisgen, Uwe; Olschok, Simon; Gach, Stefan
- 2016_1 Nutzung von Low-Transformation-Temperatur-Werkstoffen (LTT) zur Eigenspannungsreduzierung im Elektronenstrahlschweißprozess - Reisgen, Uwe; Olschok, Simon; Gach, Stefan
- 2017_1 Confirmation of tensile residual stress reduction in electron beam welding using low transformation temperature materials (LTT) as localized metallurgical injection - Part 1: Metallographic analysis - Gach, Stefan; Schwedt, Alexander; Olschok, Simon; Reisgen, Uwe; Mayer, Joachim
- 2017_2 Residual stress reduction by low-transformation-temperature (LTT) filler materials in electron beam welding - Reisgen, Uwe; Olschok, Simon; Gach, Stefan
- 2017_3 Confirmation of tensile residual stress reduction in electron beam welding using low transformation temperature materials (LTT) as localized metallurgical injections - Part 2: Residual stress measurement - Gach, Stefan; Olschok, Simon; Francis, John (UK); Reisgen, Uwe
- 2017_4 Simulation des thermischen Einflusses auf Verzug und Eigenspannungen in Kohlenstoff-Mangan-Stählen im Elektronenstrahlschweißprozess – Reisgen, Uwe; Olschok, Simon; Mokrov, Oleg; Gach, Stefan; Akyel, Fatma
- 2017_5 Residual stress reduction in carbon manganese steels using low-transformation-temperature (LTT) filler materials - In situ diagnostics with digital image correlation – Gach, Stefan; Olschok, Simon; Arntz, Dennis; Reisgen, Uwe
- 2017_6 Influence on martensite-start-temperature and volume expansion of low-transformation-temperature materials used for residual stress relief in beam welding - Reisgen, Uwe; Olschok, Simon; Sharma, Rahul; Gach, Stefan
- 2017_7 Characterisation of quasi-stationary temperature fields in laser welding by infrared thermography - Francis, John; Gach, Stefan; Olschok, Simon; Reisgen, Uwe; Haeusler, Andre.; Gillner, Arnold.; Poprawe, Reinhart
- 2018_1 Residual stress reduction of laser beam welds by use of low-transformation-temperature (LTT) filler materials in carbon manganese steels - In situ diagnostic: Image correlation- Gach, Stefan; Olschok, Simon; Arntz, Dennis; Reisgen, Uwe
- 2019_1 The effect of beam oscillations on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded steel joints - Komerla, Krishna; Gach, Stefan; Vossel, Thomas; Schwedt, Alexander; Bührig-Polaczek, Andreas; Reisgen, Uwe; Bleck, Wolfgang

2020_1

Finite element simulation of residual stress induced by high energy beam welding in dual phase steel - Komerla, Krishna; Gach, Stefan; Akyel, Fatma; Vossel, Thomas; Reisgen, Uwe; Bleck, Wolfgang

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
2 Motivation und Zielsetzung	2
3 Stand der Technik und Forschung	8
3.1 Phasenzustände in Stählen	8
3.1.1 Gleichgewichtsphasen	8
3.1.2 Bainitische und martensitische Phasenumwandlung	11
3.1.3 Thermodynamik der Martensitbildung	13
3.1.4 Einfluss der Legierungselemente auf M_s	15
3.1.5 Ausbildung des Gefüges in Abhängigkeit der Legierungszusammensetzung	15
3.2 Eigenspannungen	17
3.2.1 Definition	17
3.2.2 Mehrachsige Spannungszustände	18
3.2.3 Eigenspannungen und Verzug in Schweißnähten.....	19
3.2.4 Arten von Eigenspannungen	21
3.2.5 Minimierung und Kompensation von Eigenspannungen	22
3.2.6 Messmethoden von Eigenspannungen	22
3.3 LTT-Werkstoffe	24
3.3.1 Werkstoffklassifizierung.....	24

3.3.2	Beeinflussung von Eigenspannungen und Verzug	25
3.4	Strahlschweißen	26
3.4.1	Elektronenstrahlschweißen	27
3.4.2	Laserstrahlschweißen	29
3.4.3	Vergleich Lichtbogen - Strahlverfahren für den Einsatz von LTT- Werkstoffen.....	31
3.5	Simulative Abbildung der Eigenspannungen und des Verzugs.....	31
3.6	Adaption theoretischer Simulationsmodelle	34
3.6.1	Thermische Simulation - Äquivalente Wärmequelle.....	35
3.6.2	Metallurgisches Modell.....	37
4	Konzeptionierung und Herangehensweise	42
4.1	Konzept zur in-situ Reduktion des Schweißverzugs	42
4.2	Herangehensweise	43
4.2.1	Bestimmung der optimalen M_s	44
4.2.2	Einstellen der M_s im Prozess.....	45
4.2.3	Auslegung des Zusatzwerkstoffs (SZW)	45
4.2.4	Erfassung der Phasenumwandlung im Prozess	45
5	Methoden	46
5.1	Werkstoffauswahl.....	46
5.2	Einstellung eines definierten Gefüges im Schweißgut	46
5.3	Probenpräparation und Versuchsdurchführung	47
6	Nachweis Druckspannungseinleitung durch martensitische Umwandlung	50
6.1	Nachweis der martensitischen Umwandlung im EB-Prozess.....	50

6.1.1	Chemische Zusammensetzung.....	50
6.1.2	Metallurgische Analyse	51
6.1.3	Zwischenergebnis	57
6.2	Nachweis der Eigenspannungsreduktion durch martensitische Umwandlung im EB-Prozess	58
6.2.1	Versuchsdurchführung und Analyse des Ausgangszustandes.....	58
6.2.2	Vergleich der Eigenspannungszustände geschweißter Proben	61
6.2.2.1	Artgleicher Zusatzwerkstoff	64
6.2.2.2	LTT-Zusatzwerkstoff.....	64
6.2.3	Interpretation: Nachweis des LTT-Effekts im EB-Schweißen	65
6.3	Zwischenergebnis	66
7	Eigenschaften variierender Gefügezusammensetzung	67
7.1	Analytik und Probenpräparation - Dilatometermessung	68
7.2	Probenauswahl	69
7.3	Einfluss der Elemente Chrom und Nickel.....	70
7.3.1	M _s und Härte	70
7.3.2	Volumenexpansion.....	73
8	Einflussgrößen auf Nahtform und chem. Zusammensetzung im EB-Prozess	75
8.1	Analyse	75
8.2	Einfluss Strahlstrom I _b	76
8.3	Einfluss Schweißgeschwindigkeit v _s	79
8.4	Figurgröße	82

8.5	Bewertung der Methode: Beeinflussung von Nahtform und chem. Zusammensetzung	84
9	Detektion der martensitischen Phasenumwandlung durch latente Wärme	85
9.1	Vorgehensweise	85
9.2	Vergleich zwischen rechnerischer und gemessener M_s	87
9.3	Bewertung der Methode: Taktile Detektion der M_s	90
10	In-Situ Messung des Dehnungsverhaltens	91
10.1	Versuchsbedingungen	91
10.2	Metallurgische Auswertung	94
10.3	Auswertung der digitalen Bildkorrelation	96
10.3.1	Zeitliche Entwicklung und Vorgänge im Vektorfeld.....	97
10.3.2	Interpretation der Oberflächenverschiebung	99
10.3.3	Vergleichende Analyse der Gesamtverschiebung	101
11	Anwendung des LTT-Effekts auf austenitische Stähle	104
11.1	Konzeptioneller Nachweis.....	105
11.2	Kaltdrahtförderung zur Erhöhung der Zusatzwerkstoffmenge.....	108
11.3	Übertrag auf die Verbindungsschweißung	111
12	Simulative Abbildung.....	120
12.1	Vorgehensweise Eigenspannungssimulation - Wärmequellenmodell	121
12.2	Werkstoffauswahl und Probengeometrie	122
12.3	Materialanalyse	122
12.3.1	Gefügeausbildung in der Schweißnaht.....	123
12.3.2	Gefügeausbildung in der WEZ	124

12.4	Vergleich Simulation und Empirie	127
12.4.1	Simulation der Temperaturverteilung.....	127
12.4.2	Simulation der Phasenanteile.....	129
12.4.3	Simulation der resultierenden Eigenspannungen	132
12.4.4	Bewertung der Methode – dreistufige Simulation	134
13	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	136
14	Ausblick - Konzeptionelle Umsetzung.....	142
14.1	Problemstellung im Anwendungsfeld Schienenfahrzeugbau	142
14.2	Theoretische Anwendung des LTT-Konzeptes im Schienenfahrzeugbau.....	143
Literaturverzeichnis.....		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang		ix

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abbau von Eigenspannungen durch plastische Verformung induziert Verzug.	2
Abbildung 2: Schweißverzug bei der Fertigung einer Schiffssektion (links) [2], Formhaltigkeitskontrolle mittels Schablone an einem ICE 3 Vario-D im Siemens-Werk in Krefeld (rechts) [3].....	3
Abbildung 3: Längenänderung von umwandlungsfreien ferritischen und austenitischen Stählen sowie eines umwandlungsfähigen Baustahls (links) [4]; Einfluss der Umwandlungstemperaturen/Gefügemorphologie auf die verbleibenden Eigenspannung (rechts) [5].....	4
Abbildung 4: Abkühl- und Aufheizkurven von reinem Eisen [11].....	9
Abbildung 5: Ausschnitt aus dem Eisen-Kohlenstoffdiagramm (metastabil) [11]	10
Abbildung 6: Verschiebung der γ - α -Umwandlung eines untereutektoiden Stahls [12].....	11
Abbildung 7: Entstehung des Martensitgitters aus dem KFZ-Gitter nach Bain [11]	12
Abbildung 8: exemplarische Temperaturabhängigkeit der Enthalpie G für Austenit und Martensit.....	13
Abbildung 9: Arten der Martensitbildung bei metastabilen austenitischen Stählen [15]	14
Abbildung 10: Schaeffler-Diagramm	16
Abbildung 11: Superposition von Eigenspannungen I. bis III. Art zum Gesamtspannungszustand. [4].....	18
Abbildung 12: Mehrachsige Spannungszustände.....	18
Abbildung 13: Qualitativer Spannungsverlauf aus Volumenschrumpfung: Längsspannungsverlauf (i) sowie Querspannungsverlauf (ii) in einem stumpfgeschweißten Blech. Schrumpfungarten (iii) [11].....	20
Abbildung 14: Auswirkung von Schrumpfeigenspannungen [4]	20
Abbildung 15: Änderung des Querspannungsverlaufs durch Überlagerung von Schrumpf-, Abschreckungs- und Umwandlungsspannungen [4].....	21
Abbildung 16: Systematischer Aufbau einer Elektronenstrahlschweißanlage [32].....	28
Abbildung 17: Prinzip der Laserstrahlerzeugung [34]	30

Abbildung 18: Fokussierung mit charakteristischen Strahlgrößen am Beispiel einer transmissive Strahlformung mittels Linsen [34]	30
Abbildung 19: Einteilung der Schweißsimulation nach [35].....	32
Abbildung 20: Modell Äquivalente Wärmequelle – Kombiniertes Wärmequellenmodell, bestehend aus sphärischem und konischem Anteil (links), Gauß'sche Verteilung des Wärmestroms als Funktion des Ortes (rechts) [64].....	36
Abbildung 21: Exemplarische Dilatometerkurve – Definition von Austenitstart- (T_c) und Austenitfinish-Temperatur (T_D) (links), Hebelgesetz zur Berechnung der Fest-Flüssig- Anteile (rechts) [64].....	39
Abbildung 22: Dilatometermessung mit M_s und M_f während der Abschreckung in Argongas.[64]	40
Abbildung 23: Konzept der Verzugskompensation durch Phasenumwandlung	42
Abbildung 24: Schematische Darstellung unterschiedlicher hoher M_s auf den resultierenden Eigenspannungszustand bei Raumtemperatur, angelehnt an Wohlfahrt (Abbildung 2).....	44
Abbildung 25: Schaeffler-Diagramm - Einordnung des Schweißgutes anhand Energiedispersiven Röntgenmessung (EDX) und Abschätzung über Aufmischungsgrad – Austenit (A); Ferrit (F); Martensit (M)	47
Abbildung 26: Probenpräparation Schweißversuche (links): Prinzipskizze, (rechts) Lichtbildaufnahme	48
Abbildung 27: Lichtbildaufnahme Nahtoberseite (links); Querschliff mit Markierung EBSD/SE-Scan (hellblaues Rechteck) analysierten Ausschnitts, EDX-Linienscan (rote Volllinie) (rechts)	49
Abbildung 28: EDX-Analyse des Schweißgutes quer zur Naht (Nahtmitte)	51
Abbildung 29: Sekundärelektronenaufnahme (SE) des ausgewählten Bildausschnitts (800fach) mit Detailaufnahmen (2000fache Vergrößerung).....	52
Abbildung 30: EBSD-Analyse des ausgewählten Bildausschnitts, beginnend von oben nach unten mit der Schweißnaht (1) über die WEZ (2) bis in den unbeeinflussten Grundwerkstoff (3) – dargestellt werden von links nach rechts: a) Image-Quality-Map (IQ), b) Kohlenstoffkonzentration (EDX Messung), c) Kernel Average misorientation map (KAM 300 nm, 5°), d)	

Nicht-martensitische Großwinkelkorngrenzen – Identifizierung der primärerstarten Austenitkörnner, e) Orientierungsbeziehungen nach Greninger Trojano zwischen benachbarten Martensitlanzetten (grün)	55
Abbildung 31: Korrelation aus Härte und lokaler Missorientierung , ausgewertet über die ausgewählte Probe, dargestellt vor der IQ-Map im Hintergrund	57
Abbildung 32: Skizze der Bohrmesspositionen: Probenoberseite (Draufsicht - links oben) sowie im Querschliff (links unten); Orientierung des Koordinatensystems und der Spannungsrichtungen (rechts)	59
Abbildung 33: Eigenspannungsprofil nach Spannungsarmglühen (a), sowie nach der Probenvorbereitung Fräsen und Schleifen (b)	60
Abbildung 34: Artgleiches - Schweißzusatzmaterial bezogen auf die Normalspannungen: (a) Querspannungen; b) Längsspannungen; c) Scherspannungen - aufgetragen in unterschiedlichen Tiefen, bezogen auf die Oberfläche im Abstand zur Mittellinie der Schweißnaht.....	62
Abbildung 35: LTT - Schweißzusatzmaterial bezogen auf die Normalspannungen: (a) Querspannungen; b) Längsspannungen; c) Scherspannungen - aufgetragen in unterschiedlichen Tiefen, bezogen auf die Oberfläche im Abstand zur Mittellinie der Schweißnaht.....	63
Abbildung 36: Schematische Darstellung einer Dilatometermessung - Längendehnung über Temperatur – mit charakteristischen Umwandlungspunkten	69
Abbildung 37: Schaeffler-Diagramm mit ausgewählten Probenzusammensetzungen, eingezeichnet sind die tatsächlich erschmolzenen Proben, gemessen mittels Funkenspektralanalyse (OES).....	70
Abbildung 38: a) Einfluss der Elemente Chrom und Nickel auf die M_s - Säulen: Berechnet gemäß Gleichung 1, Linien: Gemessen im Versuch mittels Dilatometrie; b) Verteilung der Vickers-Härtewerte in Abhängigkeit von Chrom- und Nickeläquivalent	72
Abbildung 39: Längendehnung der Schmelzproben in der Dilatometermessung: a) Prozentuale Ausdehnung bezogen auf die Ausgangslänge aufgetragen über der gemessenen M_s ; b) Prozentuale Ausdehnung der	

unterschiedlichen Chromäquivalente aufgetragen über dem Nickeläquivalent	73
Abbildung 40: Bemessung Nahtdimension in Querschliff	76
Abbildung 41: Makro-Querschliffe der Versuchsreihe Strahlstromvariation von 9 mA bis 27 mA bei konstanter Schweißgeschwindigkeit $v_s = 15$ mm/s	76
Abbildung 42: Einfluss des Strahlstroms auf: a) Geometrische Gestalt in Form von Nahttiefe,-breite sowie Nahtfläche, (optisch gemessen im Querschliff); b) Anteil der Legierungselemente Chrom, Nickel sowie Mangan im Schweißgut, ermittelt mittels EDX-Analyse und deren Einfluss auf die rechnerische M_s gemäß Steven und Haynes (Gleichung 1), c) Einordnung der Schweißgüter im Schaeffler-Diagramm anhand ihrer chem. Zusammensetzung	77
Abbildung 43: Querschliffe (Makro) Schweißgeschwindigkeitsvariation bei konstanter Streckenenergie von 192 J/mm für die Geschwindigkeiten 5 mm/s bis 27,5 mm/s.....	80
Abbildung 44: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit bei konstanter Streckenenergie $E = 192$ J/mm a) Geometrische Gestalt in Form von Nahttiefe,-breite sowie Nahtfläche, gemessen im Querschliff; b) Anteil der Legierungselemente Chrom, Nickel sowie Mangan im Schweißgut, ermittelt mittels EDX-Analyse und deren Einfluss auf die rechnerische M_s gemäß Steven und Haynes (Gleichung 1), c) Einordnung der Schweißgüter im Schaeffler-Diagramm anhand ihrer chem. Zusammensetzung	81
Abbildung 45: Querschliffe (Makro) Amplitudenvariation bei konst. Streckenenergie von 96 J/mm (oben) sowie für $E = 120$ J/mm (unten).....	82
Abbildung 46: Variation der Amplitude bei konstanter Streckenenergie $E = 96$ J/mm sowie $E = 120$ J/mm (a & b): Geometrische Gestalt in Form von Nahttiefe,-breite sowie Nahtfläche, gemessen im Querschliff (c & d): Anteil der Legierungselemente Chrom, Nickel sowie Mangan im Schweißgut, ermittelt mittels EDX-Analyse und deren Einfluss auf die rechnerische M_s gemäß Steven und Haynes (Gleichung 1), e) Einordnung der Schweißgüter im Schaeffler-Diagramm anhand ihrer chem. Zusammensetzung.....	83

- Abbildung 47: exemplarische Abkühlkurve (oben), 1. Ableitung (Mitte) und 2. Ableitung (unten)
Parameter: 20 mA Strahlstrom und 12,5 mm/s Schweißgeschwindigkeit...86
- Abbildung 48: Vergleich zwischen empirisch ermittelter und errechneten minimaler bzw. maximaler M_s gemäß der Formel nach Steven und Haynes (Gleichung 1) –
Parametervariation: Strahlstrom88
- Abbildung 49: Vergleich zwischen empirisch ermittelter und errechneter minimaler bzw. maximaler M_s gemäß der Formel nach Steven und Haynes (Gleichung 1) –
Parametervariation: Schweißgeschwindigkeit bei konst. Streckenenergie .89
- Abbildung 50: Vergleich zwischen empirisch ermittelter und errechneter minimaler bzw. maximaler M_s gemäß der Formel nach Steven und Haynes (Gleichung 1) –
Parametervariation- Oszillationsamplitude der kreisförmigen Strahlfigur ...90
- Abbildung 51: Oberflächenpräparation – Übersicht mit Messausschnitt (blaues Rechteck-
qualitativ – Messgröße 2,5 mm x 24 mm) (links); stochastisches
Punktmuster (Speckle) als Detailaufnahme (rechts).....92
- Abbildung 52: Versuchsaufbau digitale Bildkorrelation – a) Frontalansicht; b) Rückansicht;
c) Prinzipskizze Seitenansicht93
- Abbildung 53: Analyse der drei gewählten Parameter T1 bis T3 :a) Makroschliffe b)
geometrische Auswertung der Schmelzzonen der Schweißnähte T1 bis T3;
c) Anteil der Legierungselemente sowie M_s ; d) Einordnung der
Schweißgüter im Schaeffler-Diagramm95
- Abbildung 54: Bildkorrelationsaufnahmen während des Abkühlzyklus der Probe T3 – mit
zunehmenden Zeitinkrement a-e). In der Bildmitte ist die Schweißnaht zu
sehen, jeweils rechts und links davon die Überlagerung der berechneten
Verschiebungsvektorkarten zum jeweiligen Zeitpunkt.98
- Abbildung 55: Vergrößerte Darstellung des Vektorfeldes in direkter Umgebung der
Schweißnaht am Umkehrpunkt der Quellbereiche99
- Abbildung 56: Qualitative Aufleitung (Integration) der aus der Literatur bekannten
Spannungsverteilung $f(x)$ auf die Verschiebung als Stammfunktion $F(x)$ – M:
Maxima bzw. Minima, W: Wendepunkte (links) – Zeitliche Variation des

Spannungsaufbaus und Auswirkung auf das Dehnungsfeld bzw. dessen Aufleitung zum Verschiebungsvektorfeld (rechts).....	100
Abbildung 57: Vergleich der durchschnittlichen Gesamtverschiebungen im Vektorfeld für artgleichen sowie LTT-Zusatzwerkstoff für die drei untersuchten Parameter T1-T3. Die aufgezeichneten Werte entsprechen einem Durchschnittswert der Gesamtverschiebung für eine Seite der Schweißnaht zwischen Referenzbild im warmen Zustand und Raumtemperatur.	102
Abbildung 58: Makroaufnahmen im Querschliff mit variierendem Strahlstrom in hochlegiertem Grundwerkstoff 1.4301 bei eingelegtem unlegiertem Zusatzwerkstoff G3Si1.....	106
Abbildung 59: Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes und berechnete M_s gemäß Gl. 1 über das Prozessfenster bei Einsatz von unlegiertem Zusatzmaterial G3Si1 in hochlegiertem Grundwerkstoff (1.4301)	106
Abbildung 60: Schaeffler-Diagramm mit Positionen des Grundwerkstoff (1.4301) und Zusatzwerkstoff (G3Si1) sowie die Chrom- und Nickel-Äquivalente der Versuche über das Prozessfenster.....	107
Abbildung 61: Kaltdrahtfördereinrichtung in der Elektronenstrahlkammer, einstellbar in 4 Achsen (X,Y,Z sowie Winkel) – a) Fotografische Aufnahme (links); b) Prinzipskizze Oszillationsfigur Kreis mit den für die Drahtzufuhr relevanten Größen: Zuführwinkel α sowie Eintrittshöhe h des Drahtes in den Strahlengang.	108
Abbildung 62: Makroaufnahmen im Querschliff der Schweißversuche mit Drahtförderung (a); EDX-Analyse des Nahtgefüges über die Versuchsreihe, sowie berechneter Verlauf der M_s nach der Formel von Steven und Haynes (Gleichung 1). (b); Schaeffler-Diagramm mit eingetragenen Positionen der Versuchsreihe im martensitischen Gebiet (c)	110
Abbildung 63: Nahtvorbereitung Verbindungsschweißung – die Rechteckfuge wird hälftig auf dem linken und rechten Fügepartner angebracht (links); Prinzipskizze Strahlfigur Punkt+Linie (rechts)	112
Abbildung 64: Versuchsreihe Verbindungsschweißung 1.4301 – Makroschliffe (links), vertikaler Linescan in der Nahtmitte mittels REM-EDX (rechts).....	113

- Abbildung 65: Exemplarischer EDX-Linescan quer zur Naht - Parameter 20-22 bei 1/3 Nahttiefe (a) sowie 2/3 Nahttiefe (b) 115
- Abbildung 66: Positionen im Schaeffler-Diagramm (Auszug) der Messpositionen aus dem EDX-Linescans in vertikaler Richtung in Nahtmitte – a) Parameter 20-15; b) Parameter 20-18; c) Parameter 20-22 116
- Abbildung 67: Vergleich zwischen niedrig legiertem Schweißzusatz G3Si1 und artgleichem hochlegiertem Schweißzusatz 19-9 als Benchmark bei variierendem Energieeintrag - Makroschliff (a), Vergleich des Winkelverzugs auf der Nahtober- und -unterseite gemessen im Querschliff (b) 118
- Abbildung 68: Exemplarische Makroschliffe von Schweißverbindungen im Querschliff: S235 (a & b) sowie DP1000 (c & d) mit oszillierendem Strahl (a & c) sowie stationärem Strahl (b & d)..... 123
- Abbildung 69: EBSD-Karten (Inverse Pole Figur), die aus der Mitte der S235JR- und DP1000-Schweißverbindungen entnommen sind und die die Morphologie und die Variation der Korngröße über die SZ (links), GKWEZ und FKWEZ bis in den GWS (rechts) darstellen. Gezeigt werden die mit oszilliertem (a, c) und stationärem (b, d) Strahl geschweißten Nähte..... 125
- Abbildung 70: Lichtmikroskopische Aufnahmen von S235JR-(a) und DP1000-Stahlschweißverbindungen (b), die verschiedenen Phasen: Martensit (M); Bainit (B) und Ferrit (F) über die relevanten Bereiche Schweißnaht (SN, links), Grobkorn-Wärmeeinflusszone (GKWEZ, Mitte) und Feinkorn-Wärmeeinflusszone (FKWEZ, rechts)..... 126
- Abbildung 71: a) Vergleich zwischen den experimentellen Thermoelementdaten (EXP) und den simulierten Temperaturkurven für die Messtelle (SIM) Positionen: 2 mm Abstand von der Schweißnahtmittellinie b) Simulierter Temperaturgradient über die Zeit in [s] und den Abstand zur Schweißnahtmitte in [mm] an der Blechoberseite an äquidistanten Knoten im Abstand von 0,2 mm 128
- Abbildung 72: Typische Tropfengeometrie des Schmelzbades (a); Temperaturverteilung in der DP1000-Schweißverbindung sowie die Darstellung verschiedener Schweißzonen, die aufgrund ihrer Spitzentemperatur) gekennzeichnet sind (b); Schweißnaht im Querschliff im geätzten Zustand (c) 129

Abbildung 73: FE-Analyse: Entstehung von Ferrit-, Martensit-, Austenit- und Flüssigkeitsphasenanteilen während der Aufheizphase für die Schmelzzone (a) und die WEZ (b), aufgetragen über einer logarithmischen Zeitskala... 130	
Abbildung 74: FE-Analyse: Hohe Abkühlraten in der Wärmeeinflusszone, die zur vollständigen martensitischen Umwandlung führen (a) – Positionsangabe bezogen auf Abstand von der Schweißnahtmittellinie; Die Ausbildung der verschiedenem Phasenanteile, für die Schmelzzone (a) und die WEZ (b) während der Abkühlung, dargestellt über einer logarithmischen Zeitskala 131	131
Abbildung 75: Evolution und Verteilung des Martensitphasenanteils während der Abkühlung der Schweißnaht, berechnet durch FE-Simulation..... 132	132
Abbildung 76: Positionen der experimentelle Eigenspannungsmessung auf der geschweißten Probe (blaue Punkte); Auswertungspfade der simulativen Eigenspannungen aus dem Finite-Elemente-Netz auf der Schweißnahtmitte (Pfad 1 und senkrecht dazu (Pfad 2))..... 133	133
Abbildung 77: Vergleich der experimentellen und simulierten Längseigenspannung der Schweißverbindung in a) Schweißnahtlängsrichtung (Pfad 1) sowie b) orthogonal zu Schweißrichtung in der Nahtmitte (Pfad 2)..... 134	134
Abbildung 78: links: Segment einer ICE4 Seitenwand, lasergeschweißte Stahlleichtbauweise. Rechts Dachträger S-Bahn Hamburg, lasergerechte Konstruktion [13]..... 142	142
Abbildung 79: Exemplarische Umsetzung des LTT-Konzepts für hochlegierten Werkstoff im Schienenfahrzeugbau 144	144

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Grund- und Zusatzwerkstoffs LTT-10-10 ermittelt durch Funkenspektalanalyse OES.....	46
Tabelle 2: Schweißparameter Einschweißung Low-Transformation-Temperature Schweißdraht in Stahl S235JR.....	48
Tabelle 3: Temperaturzyklus der Dilatometermessung.....	68
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des Reineisens gemessen durch Emissionspektrometrie (OES)	69
Tabelle 5: Schweißparameter Bildkorrelation	93
Tabelle 6: Legierungszusammensetzung hochlegierter Grundwerkstoff sowie hoch- und niedriglegierte Schweißzusätze	105
Tabelle 7: geom. Abmessung und Volumenfüllung (eingelegter Draht	109
Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung Dualphasenstahl Dp1000 in Gew.%	122
Tabelle 9: Parameter des Wärmequellenmodells (gefitted via Trial-and-Error-Methode)	127

Formelzeichen und Abkürzungen

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Begriff	erstmals auf Seite
A	Austenit	47
A_{c1}	Beginn der Austenitbildung im Aufheizzyklus	8
A_{c3}	Ende der Austenitumwandlung im Aufheizzyklus	6
A_{c4}	Umwandlungstemperatur zu δ -Eisen	8
Al	Aluminium	69
Äq.	Äquivalent	72
A_r	Ferrit/Perlitstarttemperatur im Abkühlen (franz. refroidir)	8
A_r'	untere kritische Abkühlgeschwindigkeit	11
A_{r1}	Beginn der Ferrit/Perlitumwandlung im Abkühlzyklus	11
A_{r3}	Ende der Ferrit/Perlitumwandlung im Abkühlzyklus	11
ÄWQ	Äquivalente Wärmequelle	33
B_s	Bainitstarttemperatur	11
C	Kohlenstoff	9
Cr	Chrom	6
Cr-Äq.	Chrom-Äquivalent	108
Cu	Kupfer	123
DFLUX	Distributed Flux Subroutine der Abaqus Simulationssoftware zur Integration eines transienten Wärmeflusses	122
DIC	Digital image correlation	23
DIN	Deutsches Institut für Normung	27

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Begriff	erstmal auf Seite
DMS	Dehnmessstreifen	23
DP1000	Dualphasenstahl	34
DP-Stahl	Dualphasenstahl	34
E	Elastizitätsmodul, E-Modul	22
EB	Electron Beam, Elektronenstrahl	49
EBSD	Electron Backscatter Diffraction, Elektronenrückstreuung	23
EBW	Electron Beam Welding	27
EDX	Energy Dispersive X-ray spectroscopy; Energiedispersive Röntgenspektroskopie	48
EMK	Elektromagnetische Kompatibilität	9
EN	Europäische Norm	27
ESPI	Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry	23
F	Ferrit	16
Fe	Eisen	11
Fe₃C	Zementit	11
FEM	Finite Elemente Methode	33
FE-Simulation	Finite Elemente Simulation	128
FKWEZ	Feinkorn-Wärmeeinflusszone	125
G3Si1	Schweißzusatzdraht mit Silizium und Mangan	59
GKWEZ	Grobkorn-Wärmeeinflusszone	125
GWS	Grundwerkstoff	3
IQ	Image-Quality-Map	54

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Begriff	erstmalig auf Seite
ISO	International Organization for Standardization	27
KAM	Kernel Average Misorientation,	53
KFZ	kubisch-flächenzentriert	8
KRZ	kubisch-raumzentriert	8
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	29
LTT	Low-Transformation-Temperature-Werkstoffe	6
LVDT	Linear Variable Differential Transformer Messsystem	68
M	Martensit	47
M_r	Martensitfinishtemperatur	11
MK	Mischkristall	10
Mn	Mangan	6
Mo	Molybdän	16
M_s	Martensitstarttemperatur	6
MSG	Metallschutzgas-Schweißen	130
M_{s-Max}/M_{s-Min}	Martensitstarttemperatur mit maximalem/minimalem Kohlenstoffgehalt in der Legierung	81
N	Stickstoff	119
Ni	Nickel	15
Ni-Äq.	Nickel-Äquivalent	71
OES	Optische Emissionsspektroskopie	47
P	Phosphor	122
REM	Rasterelektronenmikroskopie	50

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Begriff	erstmalig auf Seite
RT	Raumtemperatur	44
S	Schwefel	122
S235JR	unlegierter Baustahl	47
SE	Sekundärelektronenaufnahme	51
Si	Silizium	16
SN	Schweißnaht	119
SZ	Schmelzzone	117
SZW	Schweißzusatzwerkstoff	3
T_G	Gleichgewichtstemperatur	13
Ti	Titan	119
VCSEL-Zellen	vertical-cavity surface-emitting laser	92
W	Wendepunkt	100
WEZ	Wärmeeinflusszone	21
WIG	Wolfram-Inertgas-Schweißen	6
X	Achse, Koordinate	35
XRD	X-ray diffraction (Röntgenbeugung)	23
Y	Achse, Koordinate	35
Z	Achse, Koordinate	35
α-Eisen	kubisch-raumzentriertes Eisen	8
γ-Eisen	Austenit	8
δ-Eisen	δ-Ferrit	8

Verwendete Einheiten

Zeichen	Einheit	erstmal auf Seite
"	Zoll	58
%	Prozent	9
°	Winkelmaß	55
°C	Grad Celsius	6
A	Ampere (inkl. zugehöriger SI-Präfixe)	77
g	Gramm	70
Gew. %	Gewichtsprzent	15
HV	Vickers Härte	56
Hz	Hertz	92
J	Joule (inkl. zugehöriger SI-Präfixe)	48
K	Kelvin	39
L	Liter	91
M	Meter (inkl. zugehöriger SI-Präfixe)	27
N	Newton	61
Pa	Pascal (inkl. zugehöriger SI-Einheiten)	48
S	Sekunde (inkl. zugehörige SI-Präfixe)	48
V	Volt (inkl. zugehöriger SI-Präfixe)	85
W	Watt (inkl. zugehöriger SI-Präfixe)	92

Verwendete Formelzeichen

Zeichen	Beschreibung	erstmalig auf Seite
D	Durchmesser	30
d_f	Fokussdurchmesser	30
d_k	Kollimierdurchmesser	30
E	Streckenenergie	77
Exp	Exponentialfunktion auf Basis der Euler-Zahl e	35
ε	Maß der lokalen Verformung	18
f(x)	Funktion des Spannungsverlaufs	95
F(x)	Stammfunktion	95
f_f	Fokussierlänge	30
f_G	Anpassungsparameter	38
f_k	Kollimierlänge	30
f_N	Anpassungsparameter	38
G	Wachstumsrate	38
G	Enthalpie	13
H	Dicke des Werkstücks	36
I_b	Strahlstrom	36
L	Strom	120
M_d	plastisch Verformung ohne Martensitbildung	15
M_f	Martensitfinishtemperatur	40
M_s	Martensitstarttemperatur	40
M_{s,σ}	Übergang zwischen spannungsinduzierter oder verformungsinduzierter Martensitbildung	15
Ṅ	Keimzahl	38

Verwendete Formelzeichen

Zeichen	Beschreibung	erstmals auf Seite
P	Strahlleistung	75
Q	Wärmequelle	40
Q_v	Wärmeflussverteilung	35
R₀	Basisradius des Kegels	36
Re	Streckgrenze	44
R_g	Radius der Kugel	36
\dot{T}	Erwärmungsrate	38
T_c	experimentell ermittelte Umwandlungstemperatur	38
T_D	experimentell ermittelte Umwandlungstemperatur	38
T_G	Gleichgewichtstemperatur	13
Ti	Titan	119
T_r	Abkühlgeschwindigkeit	28
T_s	Schmelztemperatur	7
U_b	Beschleunigungsspannung	36
V	Schweißgeschwindigkeit	35
V_{m0}	anfänglicher Volumenanteil des Martensits	38
V_{α0}	anfänglicher Volumenanteil des Ferrits	38
v_d	Drahtfördergeschwindigkeit	104
V_m	Martensitvolumenanteil	39
V_{α}	Volumenanteil α -Eisen	41
V_{α'}	Volumenanteil α' -Eisen	41
V_{γ}	vorhandener Austenitanteil	41

Verwendete Formelzeichen

Zeichen	Beschreibung	erstmal auf Seite
Δ	Dehnung	40
Δ	Differenz	14
ΔG_A	Aktivierungsenergie	14
$\Delta G_{\text{mech.}}$	mechanische Energie	14
ΔT	Temperaturdifferenz	14
ϵ_{xx}	Längenänderung	19
ϵ_{yy}	Querschrumpfung	18
H	Energieabsorptionskoeffizient	36
Θ_f	Divergenzwinkel	30
N	Poissonzahl	19
σ_{xx}	eindimensionale Spannung	18
τ_{xy}	Schubspannungen	57
Ψ	Wärmefluss	36