

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