

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG .....</b>	<b>5</b>
2.1	LEICHTBAU MIT STAHL – TECHNOLOGISCHE GRUNDLAGEN .....	5
2.1.1	Vorbemerkungen.....	5
2.1.2	Leichtbaukonzepte und zum Einsatz kommende Fertigungstechnologien .....	6
2.1.3	Struktur-/Formleichtbau – Profilmörmige Bauteile hergestellt mittels Walzprofilieren .....	9
2.1.3.1	Walzprofilieren – Einleitung, Entwicklung und aktueller industrieller Bedarf .....	9
2.1.3.2	Verfahrensbeschreibung und Grundlagen des Walzprofilierens .....	10
2.1.4	Fertigungsleichtbau – Presshärten: Verfahren und Werkstoffe .....	15
2.1.4.1	Presshärten – Einleitung, Entwicklung und aktueller industrieller Bedarf .....	15
2.1.4.2	Verfahrensbeschreibung und Grundlagen – Presshärten .....	17
2.1.4.3	Stähle für die Warmumformung – chemische Zusammensetzung und deren Werkstoffeigenschaften.....	19
2.1.4.4	Aktuelle Oberflächenveredelungen für das Presshärten.....	21
2.1.4.5	Charakterisierung des Prozessfensters im Hinblick auf die zu untersuchende Verfahrenstechnologie .....	25
2.1.5	Kombination der Leichtbaukonzepte – Kontinuierliche Profilerstellung mit integrierter Wärmebehandlung.....	28
2.1.5.1	Walzprofilieren mit integrierter Wärmebehandlung .....	28
2.1.5.2	Gleitziehbiegen mit integrierter Wärmebehandlung .....	28
2.2	SIMULATION/PROZESSMODELLIERUNG PROFILBILDENDER VERFAHREN MIT INTEGRIERTER WÄRMEBEHANDLUNG .....	31
2.2.1	Kaltprofilierprozess.....	31
2.2.2	Kontinuierliche Fertigungsprozesse mit integrierter Wärmebehandlung.....	33
2.2.2.1	Gleitziehbiegen mit integrierter Wärmebehandlung .....	33
2.2.2.2	Walzprofilieren mit integrierter Wärmebehandlung .....	35
2.3	ERWÄRMUNGSTECHNOLOGIEN ZUR EINBRINGUNG LOKAL DEFINIERTER BAUTEILEIGENSCHAFTEN BZW. ZUR WÄRMEBEHANDLUNG DÜNNER BLECHSTRUKTUREN .....	36
2.3.1	Flammwärmen (Flamme/Brenner) .....	36
2.3.2	Lichtstrahlwärmen (Infrarot-Punktstrahler) .....	37
2.3.3	Laserstrahlwärmen.....	37
2.3.4	Konduktives Wärmen .....	37
2.3.5	Induktives Wärmen .....	38
2.3.5.1	Allgemeines zur induktiven Erwärmung in Kombination mit anderen Fertigungsprozessen.....	38
2.3.5.2	Grundlagen der induktiven Erwärmung.....	39

2.4	VERGLEICHBARE TECHNOLOGISCHE MÖGLICHKEITEN ZUR HERSTELLUNG EIGENSCHAFTSSKALIERTER BAUTEILE .....	44
2.4.1	Vorbemerkungen .....	44
2.4.2	Monolithische Strukturen (einteilige Lösungen) .....	44
2.4.3	Mehrteilige Lösungen .....	48
2.5	ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG .....	50
<b>3</b>	<b>HANDLUNGSBEDARF, ZIELSETZUNG UND LÖSUNGSWEG .....</b>	<b>53</b>
3.1	HANDLUNGSBEDARF .....	53
3.2	ZIELSETZUNG DER ARBEIT .....	53
3.3	LÖSUNGSWEG .....	55
<b>4</b>	<b>VERSUCHSPLANUNG .....</b>	<b>57</b>
4.1	RANDBEDINGUNGEN/EINFLUSSFAKTOREN BEIM WALZPROFILIEREN MIT INTEGRIERTER WÄRMEBEHANDLUNG .....	57
4.1.1	Allgemeine Betrachtung .....	57
4.1.2	Betrachtungsraum – Festlegung einzelner Parameter .....	60
4.2	BESTIMMUNG DES PROZESSFENSTERS FÜR DAS WALZPROFILIEREN MIT INTEGRIERTER WÄRMEBEHANDLUNG .....	61
<b>5</b>	<b>VERWENDETE WERKSTOFFE SOWIE ANLAGEN- UND WERKZEUGTECHNIK ZUR ENTWICKLUNG EINER TECHNOLOGIE ZUR HERSTELLUNG EINTEILIGER, EIGENSCHAFTSSKALIERTER PROFILBAUTEILE .....</b>	<b>63</b>
5.1	WERKSTOFF UND BESCHICHTUNGSSYSTEM .....	63
5.1.1	Werkstoffbeschreibung .....	63
5.1.2	Beschichtungssystem .....	63
5.2	VERSUCHSSTÄNDE UND MESSTECHNIK .....	64
5.2.1	Walzprofilieranlage und Rollensatz .....	64
5.2.2	Generatortechnik und Induktoren .....	66
5.2.3	Aufnahme der Magnetisierungskennlinien – Anlagen zur Probenvorbereitung und zur Bestimmung des Magnetisierungsverhaltens .....	67
5.2.4	Bauteilcharakterisierung und Gefügeuntersuchung .....	69
5.3	PROZESSÜBERWACHUNG .....	71
5.4	VERWENDETE SIMULATIONSSOFTWARE .....	73
<b>6</b>	<b>REFERENZVERSUCHE V-GESENKBIEGEN UND KALTWALZPROFILIEREN EINES HUTPROFILS AUS 22MNB5 .....</b>	<b>75</b>
6.1	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN .....	75
6.1.1	Gesenkbiegen .....	75
6.1.2	Walzprofilieren .....	77
6.2	FE-SIMULATION DES KALTWALZPROFILIERENS .....	77
<b>7</b>	<b>STATIONÄRES AUFHEIZVERHALTEN EINES RINGINDUKTORS UND ABSCHRECKEN MITTELS UNTERSCHIEDLICHER KÜHLMEDIEN .....</b>	<b>83</b>
7.1	ANALYSE DES AUFHEIZVERHALTENS (SCHNELLERWÄRMUNG) .....	83

---

7.1.1	Aufheizverhalten des 22MnB5 im Lieferzustand .....	83
7.1.2	Einfluss von vorgelagerten Kaltumformungen bzw. Gefügeumwandlungen auf das Aufheizverhalten des Bauteils bei Anwendung der induktiven Erwärmungsstrategie .....	87
7.2	ANALYSE DES ABKÜHLVERHALTENS (ABSCHRECKEN).....	91
7.3	WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG.....	92
<b>8</b>	<b>INTEGRATION EINER WÄRMEBEHANDLUNG IN DEN KONTINUIERLICHEN WALZPROFILIERPROZESS .....</b>	<b>95</b>
8.1	STRATEGIEN – ANLAGENKONZEPTE .....	95
8.2	EXPERIMENTELLE UND SIMULATIVE UNTERSUCHUNGEN DES ERWÄRMUNGSVERHALTENS MIT EINEM RINGINDUKTOR .....	96
8.2.1	Experimentelle Untersuchungen .....	96
8.2.2	Analyse des Aufheizverhaltens .....	96
8.2.3	Analyse des Abkühlverhaltens .....	97
8.2.4	Werkstoffcharakterisierung .....	98
8.2.5	Simulation des Erwärmungsverhaltens .....	98
8.2.6	Verifikation der experimentellen und simulativen Ergebnisse .....	101
8.3	INDUKTOR FÜR EINE LINIENFÖRMIGE ERWÄRMUNG .....	101
8.4	MÄANDERFÖRMIGER INDUKTOR FÜR EINE FLÄCHIGE ERWÄRMUNG .....	102
8.4.1	Experimentelle Untersuchungen .....	102
8.4.2	Analyse des Aufheiz- und Abkühlverhaltens .....	103
8.4.3	Gefügeuntersuchungen.....	105
8.4.4	Simulation des Erwärmungs- und Abkühlverhaltens.....	106
8.4.5	Verifikation der Ergebnisse .....	109
8.5	INDUKTOR ZUM WÄRMEN DER KOMPLETTEN PROFILGEOMETRIE IN EINEM ERWÄRMUNGSSCHRITT SOWIE KONZEPTE FÜR EINEN LOKALEN WÄRMEEINTRAG.....	110
8.5.1	Konzept eines Induktors zur globalen Erwärmung sowie zur Erwärmung lokal definierter Bauteilzonen in Längsrichtung .....	110
8.5.2	Vorbetrachtungen und Voruntersuchungen zur Auslegung der Induktorform.....	111
8.5.2.1	Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Induktorform auf das Erwärmungsergebnis .....	111
8.5.2.2	Simulative Untersuchungen zur Induktorform in Abhängigkeit der Wirkungsweise .....	115
8.5.3	Simulative Untersuchungen – Prozessanalyse.....	118
8.5.4	Herstellung des finalen Induktor-Konzentrator-Systems.....	123
8.5.5	Experimentelle Untersuchungen – Prozessanalyse.....	125
8.5.6	Verifikation der experimentellen und simulativen Ergebnisse – Bauteileigenschaften und Formgenauigkeit.....	126
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>129</b>
9.1	FORSCHUNGSERGEBNISSE.....	129
9.2	ÜBERTRAGBARKEIT IN DIE SERIENFERTIGUNG.....	131

---

9.2.1	Sonderverfahren des Walzprofilierens .....	131
9.2.2	Charakterisierung des Werkstoffverhaltens bei sehr hohen Aufheizraten.....	132
9.3	HINWEISE ZUR AUSLEGUNG VON INDUKTOREN FÜR DIE WÄRMEBEHANDLUNG IN KONTINUIERLICHEN UMFORMPROZESSEN .....	133
<b>10</b>	<b>AUSBLICK</b> .....	<b>135</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>139</b>