

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problematik .....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
<b>2</b>	<b>Stand der Erkenntnisse.....</b>	<b>5</b>
2.1	Leichtbau im Automobil .....	5
2.1.1	Leichtbauansätze.....	6
2.1.2	Stahlwerkstoffe für den Leichtbau.....	6
2.2	Warmumformen bzw. Presshärten .....	8
2.3	Bauteile und Werkstoffe im Warmformprozess .....	15
2.4	Beschichtungen im Warmformprozess .....	16
2.4.1	Aluminium-Silizium-Beschichtung .....	17
2.4.2	Zinkbeschichtung .....	20
2.4.2.1	Reine Zinkbeschichtung.....	20
2.4.2.2	Zink-Eisen-Beschichtung .....	20
2.4.3	x-tec-Beschichtung .....	21
2.5	Metallurgische Grundlagen.....	21
2.5.1	Austenitisierung .....	21
2.5.2	Martensitische Härtung.....	24
2.6	Gradierte Strukturen .....	26
2.6.1	Partielles Warmformen .....	26
2.6.2	Tailored Welded Blanks .....	28
2.6.3	Tailored Rolled Blanks .....	29
2.7	Neuere Entwicklungen in der Warmumformung.....	29
2.7.1	Zinkbeschichtungen für den direkten Warmformprozess .....	29
2.7.2	Gradierte Strukturen mit erhöhter Komplexität.....	31
2.8	Erwärmungstechnologien im Warmformprozess .....	32
2.8.1	Ofenerwärmung .....	34
2.8.2	Induktive Erwärmung .....	36
2.8.3	Konduktive Erwärmung.....	37
2.8.4	Kontakterwärmung.....	38
2.8.5	Erwärmung im Wirbelbettofen.....	38
2.8.6	Zusammenfassung möglicher Erwärmungsmethoden .....	40
2.9	Elektromagnetische Induktion für den Warmformprozess .....	41
2.9.1	Grundlagen .....	42

2.9.2	Aufbau einer induktiven Erwärmanlage .....	45
2.9.3	Anordnungsmöglichkeiten und Randbedingungen .....	45
<b>3</b>	<b>Versuchswerkstoffe und Versuchseinrichtungen .....</b>	<b>51</b>
3.1	Versuchswerkstoffe .....	51
3.2	Beschichtungen .....	53
3.3	Versuchseinrichtungen und -methoden .....	55
3.3.1	Induktionsgenerator und Induktor .....	55
3.3.2	Ofenerwärmung .....	56
3.3.3	Probenherstellung und -qualifizierung .....	56
3.3.4	Temperaturbestimmung .....	57
<b>4</b>	<b>Induktive Platinenerwärmung .....</b>	<b>59</b>
4.1	Randbedingungen und theoretische Erwärmungsdauer .....	59
4.2	Induktive Erwärmung ebener rechteckiger Platinen .....	61
4.2.1	Platinenerwärmung mit einem Flächeninduktor .....	61
4.2.2	Auswirkung des Niederhaltersystems auf die Erwärmung .....	62
4.2.3	Erweiterung des Induktors durch Feldkonzentratoren .....	64
4.2.4	Einfluss einer oszillierenden Bewegung und Automatisierung .....	66
4.3	Auswirkungen und Potenziale von Isolierungen .....	71
4.4	Wirkungsgrad der vorgestellten induktiven Erwärmung .....	75
4.5	Induktive Erwärmung geometrisch veränderter Platinen .....	77
4.5.1	Auswirkungen von Radien und Winkeln .....	78
4.5.2	Auswirkungen von Bohrungen .....	79
4.5.3	Auswirkungen von Nuten .....	80
4.5.4	Zusammenfassung .....	80
4.6	Umformsimulation einer inhomogen erwärmten Platine .....	81
<b>5</b>	<b>Kennwerte induktiv erwärmter Materialien .....</b>	<b>93</b>
5.1	Härtemessungen .....	93
5.2	Quasistatische Zugversuche .....	94
5.3	Plättchen-Biegeversuche .....	97
5.4	Beschichtungen unter induktiver Erwärmung .....	102
5.4.1	AlSi-Beschichtung .....	102
5.4.2	ZF-Beschichtung .....	103
5.5	Bauteiluntersuchungen .....	104
5.5.1	Versuchsaufbauten und Auswertungsmöglichkeiten .....	104
5.5.1.1	Quasistatische Versuche .....	104
5.5.1.2	Crashprüfstand .....	105
5.5.2	Untersuchungen an Demonstratorbauteilen .....	105

5.5.2.1	Statische Stauchbelastung.....	106
5.5.2.2	Dynamische Stauchbelastung.....	107
<b>6</b>	<b>Prozessfenster für die induktive Erwärmung.....</b>	<b>109</b>
6.1	Prozessfensteruntersuchung durch Härtemessung.....	109
6.2	Prozessfensteruntersuchung durch quasistatischen Zugversuch.....	113
6.3	Prozessfensteruntersuchung durch Plättchen-Biegeversuche .....	114
6.4	Prozessfensteruntersuchung der Beschichtungen .....	116
6.4.1	AlSi-Beschichtung / Metallurgische Aufnahmen .....	116
6.4.2	ZF-Beschichtung.....	119
6.4.3	x-tec-Beschichtung / Metallurgische Aufnahmen .....	121
6.5	Zusammenfassung der Prozessfensteruntersuchungen .....	124
<b>7</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....</b>	<b>127</b>
7.1	Warmformen mit konventioneller Rollenherderwärmung.....	127
7.2	Warmformen mit induktiver Erwärmung .....	130
7.3	Substitution der konventionellen Rollenherdofenerwärmung .....	130
7.3.1	Vergleichsrechnung auf Basis einer B-Säulen-Produktion.....	132
7.3.1.1	Variation der Taktzeit .....	134
7.3.1.2	Variation der Materialkosten .....	136
7.3.1.3	Variation der Energiekosten.....	138
7.3.1.4	Variation der Raumkosten.....	139
7.3.2	Mischkalkulation .....	139
7.4	Auswirkungen der Erkenntnisse der Erwärmung realer Platinengeometrien auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	140
7.5	Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	141
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>143</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>147</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>151</b>