

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung.....</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Liste der verwendeten Symbole.....</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract .....</b>	<b>17</b>
<b>1 Einführung.....</b>	<b>21</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	23
1.2 Aufbau der Arbeit.....	24
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>25</b>
2.1 Energieeinbringung im Schmelzbad.....	25
2.1.1 Laserstrahlschweißen .....	25
2.1.2 Lichtbogenschweißen.....	28
2.1.3 Laser-Hybridschweißen.....	28
2.2 Energieumverteilung im Schmelzbad.....	29
2.2.1 Laserstrahlschweißen .....	29
2.2.2 Lichtbogenschweißen.....	30
2.2.3 Laser-Hybridschweißen.....	32
2.3 Nutzung elektromagnetischer Kräfte.....	33
2.3.1 Im Schmelzbad .....	33
2.3.2 Im Plasma .....	35
<b>3 Elektromagnetische Kräfte im Schmelzbad.....</b>	<b>37</b>
3.1 Erzeugung elektromagnetischer Kräfte .....	37
3.2 Elektromagnetische Systeme und Konzepte .....	38
3.2.1 Strömungsinduziertes Konzept.....	40
3.2.2 Intrinsisches Konzept .....	41
3.2.3 Konduktives Konzept.....	41
3.2.4 Induktives Konzept.....	42

<b>4</b>	<b>Abschätzung der elektromagnetischen Schmelzbadbeeinflussung.....</b>	<b>43</b>
4.1	Bewegungsgleichung.....	43
4.2	Kennzahlen .....	44
4.2.1	Reynoldszahl.....	45
4.2.2	Hartmannzahl.....	48
4.2.3	Wechselwirkungsparameter.....	49
4.2.3.1	Strömungsinduzierter Wechselwirkungsparameter: $N_s$ .....	49
4.2.3.2	Konduktiver Wechselwirkungsparameter: $N_K$ .....	50
4.2.3.3	Induktiver Wechselwirkungsparameter: $N_I$ .....	51
4.2.4	MHD-Belastungsparameter .....	52
4.2.4.1	Konduktiver Belastungsparameter: $K_K$ .....	53
4.2.4.2	Induktiver Belastungsparameter: $K_I$ .....	54
4.2.5	Schwerkraftbezogene Lorentzkraftdichte.....	55
4.2.5.1	Schwerkraftbezogene, strömungsinduzierte Lorentzkraftdichte: $Z_s$ .....	55
4.2.5.2	Schwerkraftbezogene, konduktive Lorentzkraftdichte: $Z_K$ .....	56
4.2.5.3	Schwerkraftbezogene, induktive Lorentzkraftdichte: $Z_I$ .....	57
4.2.6	Magnetische Weberzahl.....	58
4.2.6.1	Konduktive magnetische Weberzahl: $We_{m,K}$ .....	58
4.2.6.2	Induktive magnetische Weberzahl: $We_{m,I}$ .....	60
4.3	Abschätzung der Stromdichten im Schmelzbad .....	61
4.4	Abschätzung der Lorentzkräfte.....	63
4.4.1	Strömungsinduziertes Konzept.....	63
4.4.2	Intrinsisches Konzept.....	64
4.4.3	Konduktives Konzept .....	65
4.4.4	Induktives System.....	69
4.4.5	Gegenüberstellung der Konzepte.....	71
4.5	Resümee der Abschätzungen .....	72
<b>5</b>	<b>Versuchseinrichtung, geeignete Werkstoffe und Systemtechnik .....</b>	<b>73</b>
5.1	Bearbeitungsstation und Strahlquellen .....	73
5.2	Werkstoffe.....	74
5.3	Systemtechnik.....	74
5.3.1	Spannmittel .....	74
5.3.2	Magnettechnik .....	75
5.3.2.1	DC-Stabmagnet .....	75
5.3.2.2	DC-Hufeisenmagnet .....	76

5.3.2.3 AC-Magnet.....	77
5.3.3 Stromquellen.....	79
<b>6 Nachweis elektromagnetischer Schmelzbadbeeinflussung .....</b>	<b>81</b>
6.1 Intrinsisches Konzept .....	81
6.1.1 CO <sub>2</sub> - Schweißversuche.....	81
6.1.2 Nd:YAG - Schweißversuche.....	87
6.1.3 Erkenntnisse zum intrinsischen Konzept .....	88
6.2 Konduktives Konzept .....	89
6.2.1 Kombination zweier unabhängiger Parameter .....	89
6.2.1.1 CO <sub>2</sub> -Schweißversuche .....	90
6.2.1.2 Nd:YAG-Schweißversuche.....	92
6.2.2 Eigenmagnetische Kräfte .....	93
6.2.2.1 Nachweis der Kraftwirkung.....	93
6.2.2.2 Erste Ergebnisse von Modellrechnungen.....	96
6.2.2.3 Visualisierung des Strömungsfeldes .....	97
6.2.3 Erkenntnisse zum konduktiven Konzept.....	98
6.3 Induktives Konzept.....	99
6.3.1 Grundsätzlicher Funktionsnachweis.....	100
6.3.2 Demonstration des Nutzungspotentials .....	102
6.3.3 Erkenntnisse zum induktiven Konzept.....	104
<b>7 Ausgewählte praxisrelevante Aspekte .....</b>	<b>105</b>
7.1 Nutzung elektromagnetischer Kräfte zur Porenreduzierung .....	105
7.2 Nutzung elektromagnetischer Kräfte zur Vermeidung des Nahtdurchhangs..	110
7.2.1 Konduktive Vermeidung des Nahtdurchhangs.....	111
7.2.1.1 Stromführung „längs“ .....	111
7.2.1.2 Stromführung „quer“.....	113
7.2.2 Induktive Vermeidung des Nahtdurchhangs .....	117
<b>8 Die Herkunft des intrinsischen Stromes .....</b>	<b>123</b>
8.1 Die Rolle des laserinduzierten Plasmas.....	124
8.2 Hypothese .....	124
8.3 Experimenteller Nachweis des intrinsischen Stromes.....	126
8.4 Charakteristika des laserinduzierten Plasmas.....	132
8.4.1 Elektronendichte.....	132

8.4.2	Elektronentemperatur .....	132
8.4.3	Debye-Länge.....	133
8.4.4	Plasmafrequenz.....	134
8.4.5	Elektrische Leitfähigkeit.....	135
8.5	Treibende Kräfte .....	136
8.5.1	Modellvorstellung.....	137
8.5.2	Abschätzung der treibenden Kräfte .....	139
8.6	Resümee zum intrinsischen Strom.....	144
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>145</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>149</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>157</b>
	Formeln zur Induktion und Skin-Effekt Theorie .....	157
	<b>Danksagung .....</b>	<b>159</b>