

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Liste der verwendeten Symbole.....	11
Extended Abstract	17
1 Einführung.....	21
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	23
1.2 Aufbau der Arbeit	24
2 Stand der Technik.....	25
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
3 Elektromagnetische Kräfte im Schmelzbad	37
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

4 Abschätzung der elektromagnetischen Schmelzbadbeeinflussung.....	43
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, konductive Lorentzkraftdichte: Z_K	56
4.2.5.3 Schwerkraftbezogene, induktive Lorentzkraftdichte: Z_I	57
4.2.6 Magnetische Weberzahl.....	58
4.2.6.1 Konductive 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
5 Versuchseinrichtung, geeignete Werkstoffe und Systemtechnik	73
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

Inhaltsverzeichnis	9
5.3.2.3 AC-Magnet.....	77
5.3.3 Stromquellen.....	79
6 Nachweis elektromagnetischer Schmelzbadbeeinflussung	81
6.1 Intrinsisches Konzept	81
6.1.1 CO ₂ - 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 ₂ -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
7 Ausgewählte praxisrelevante Aspekte	105
7.1 Nutzung elektromagnetischer Kräfte zur Porenreduzierung	105
7.2 Nutzung elektromagnetischer Kräfte zur Vermeidung des Nahtdurchhangs..	110
7.2.1 Konductive 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
8 Die Herkunft des intrinsischen Stromes	123
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
9 Zusammenfassung	145
Literaturverzeichnis	149
Anhang	157
Formeln zur Induktion und Skin-Effekt Theorie	157
Danksagung	159