

Inhaltsverzeichnis

0	Formel- und Kurzzeichen.....	IV
1	Einleitung	1
1.1	Kurzvorstellung des Verfahrens und der Motivation.....	1
1.2	Herausforderungen.....	2
1.3	Aufbau dieser Arbeit.....	3
2	Stand der Technik	5
2.1	Überblick der betrachteten Technologien	5
2.2	Plasmaschweißen	5
2.2.1	Normgerechte Einordnung	5
2.2.2	Verfahrensprinzip.....	6
2.2.3	Arten und Ausprägungen	8
2.2.4	Anwendungsbereiche.....	9
2.3	Auftragschweißen im Kontext der additiven Fertigung	11
2.3.1	Einordnung in den industriellen Zusammenhang.....	11
2.3.2	Verfahrensübersicht	12
2.3.3	Plasma-DED	14
2.3.4	Anwendungsbereiche, Marktsituation und Perspektiven.....	16
2.4	Atmosphärische Mikrowellen-Plasma-Jets	18
2.4.1	Atmosphärische Plasma-Jets	18
2.4.2	Grundlagen zu Nichtgleichgewichts- und Mikrowellenplasmen.....	19
2.4.3	Verfahrensprinzip atmosphärischer MW-Plasma-Jets	21
2.4.4	Spezifische Eigenschaften	23
2.4.5	Abgrenzung zum WPS-Verfahren	24
2.4.6	Anwendungsbereiche.....	25
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	28
4	Entwicklung des Fertigungssystems	32
4.1	Einführung in das Kapitel.....	32
4.2	Konzeption der Fertigungsanlage	32
4.2.1	Anforderungsprofil.....	32
4.2.2	Anlagenkonzept	33
4.3	Entwicklung des Bearbeitungskopfes	34
4.3.1	Funktionsanalyse	34
4.3.2	Modulare Auslegung der Konstruktion.....	39
4.3.3	Fertigungstechnische Umsetzung	45
4.4	Aufbau einer Fertigungszelle mit 3-Achs-Kinematik.....	48
4.5	Fertigungszelle mit Industrieroboter.....	50
4.6	Entwicklung einer Anlagensteuerung	52
4.6.1	Anforderungsprofil.....	52
4.6.2	Konzept	53
4.6.3	G-Code-Syntax	56
4.7	Inbetriebnahme	59
4.7.1	Validierung der Anlagensteuerung	59
4.7.2	Funktionsnachweis der Kühlung des Bearbeitungskopfes	59
4.7.3	Messung der Mikrowellenabstrahlung	61

4.8	Hochfrequenz-Anpassung für Schweißanwendungen	63
5	Thermomechanische Beschreibung des MW-Plasma-DED-Prozesses	65
5.1	Einführung in das Kapitel.....	65
5.2	Analytische Betrachtung.....	65
	5.2.1 Systembeschreibung.....	65
	5.2.2 Energetische Bilanzierung.....	66
	5.2.3 Einflussfaktoren und Zielgrößen bei der Strahloptimierung	67
5.3	CFD-Simulation	73
	5.3.1 Problembeschreibung	73
	5.3.2 Modellierung des Plasmas	73
	5.3.3 Geometrische Modellentwicklung.....	79
	5.3.4 Physikalische Definitionen.....	80
	5.3.5 Auswertealgorithmus.....	81
	5.3.6 Einfluss der Gasströme auf die Strahlcharakteristik	82
5.4	Ableitung geeigneter Betriebspunkte für das MW-DED-System	87
	5.4.1 Eingrenzung der Prozessfenster für Düsenvariante A) und B)	87
	5.4.2 Geschwindigkeitsverteilung	91
	5.4.3 Temperaturverteilung	93
	5.4.4 Sauerstoffkonzentration	94
5.5	Messtechnische Charakterisierung des Plasmastrahls	96
	5.5.1 Einfluss der Gasströme auf die Strahlcharakteristik	96
	5.5.2 Bewertung der CFD-Simulation	99
6	Verfahrensauslegung für das Draht-Auftragschweißen.....	101
6.1	Schweißversuche mit koaxialer Drahtzuführung	101
6.2	Fertigung von Schweißraupen mit lateraler Drahtzuführung	103
	6.2.1 Einflussfaktoren, Zielgrößen und Versuchsdurchführung	103
	6.2.2 Einfluss der Schweiß- und Drahtvorschubgeschwindigkeit auf die Schweißraupenausprägung	109
	6.2.3 Wirkung der Zuführart auf den Schweißprozess	121
	6.2.4 Effekt der Substratdicke auf den Schweißprozess.....	121
6.3	Fertigung von 3D-Strukturen	122
6.4	Zusammenfassung der Versuche mit lateraler Drahtzuführung	124
7	Machbarkeitsnachweis für DED-Prozesse mit koaxialer Pulverzuführung.....	125
7.1	Adaption der Anlagentechnik.....	125
7.2	Fertigung von Schweißraupen	126
	7.2.1 Einflussfaktoren, Zielgrößen und Versuchsdurchführung	126
	7.2.2 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Schweißraupenausprägung für verschiedene Werkstoffe.....	129
7.3	Fertigung von 3D-Strukturen	131
	7.3.1 Einflussfaktoren, Zielgrößen und Versuchsdurchführung	131
	7.3.2 Verarbeitung einer Aluminiumbronze	136
	7.3.3 Verarbeitung einer Aluminiumlegierung.....	139
7.4	Stichversuch mit einem keramischen Werkstoff.....	142
7.5	Zusammenfassung der Versuche mit koaxialer Pulverzuführung.....	143
8	Verfahrensauslegung für das Verbindungsschweißen.....	144
8.1	Überlappschweißen einer Stahllegierung ohne Schweißzusatz.....	144

8.1.1	Einflussfaktoren, Zielgrößen und Versuchsdurchführung	144
8.1.2	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Nahtqualität	145
8.2	Stumpfstoßschweißen mit drahtförmigem Schweißzusatz	147
8.2.1	Einflussfaktoren, Zielgrößen und Versuchsdurchführung	147
8.2.2	Einfluss der Schweiß- und Drahtvorschubgeschwindigkeit auf die Schweißqualität.....	148
8.3	Zusammenfassung der Versuche zum Verbindungsschweißen.....	150
9	Resümee und Diskussion	151
9.1	Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse.....	151
9.2	Diskussion der Ergebnisse mit Blick auf die gesteckten Ziele.....	151
10	Bewertung und Ausblick	160
10.1	Bewertung des aktuellen Technologiereifegrades	160
10.2	Entwicklungsbedarfe zur Steigerung des Prozessreifgrades	162
10.3	Ausblick auf zukünftige Anwendungsfelder.....	164
11	Literaturverzeichnis	166