

# 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<br>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<br>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<br>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 Prozessreifegrades .....                         | 162 |
| 10.3  | Ausblick auf zukünftige Anwendungsfelder .....  | 164 |
| 11    | Literaturverzeichnis .....  | 166 |