

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .	<b>ix</b>
<b>Bildverzeichnis</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .	<b>xv</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik und Forschung</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 Prozessfehler . . . . .	3
2.1.1 Porosität . . . . .	3
2.1.2 Oberflächenrauheit . . . . .	4
2.1.3 Gestaltabweichungen . . . . .	7
2.2 Charakterisierung der Anlagenoptik . . . . .	8
2.3 Einkopplung und Wärmestrahlung . . . . .	8
2.4 Prozessüberwachung für das Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	12
2.4.1 Allgemeine Anlagen-Sensorik . . . . .	14
2.4.2 Kamera-basierte laterale Pulverbett-Überwachung . . . . .	15
2.4.3 Grundlagenexperimente . . . . .	16
2.4.4 Koaxiale Schmelzbad-Überwachung . . . . .	17
2.5 Defizite der Prozessüberwachung . . . . .	23
<b>3 Werkstoffe, Anlagentechnik, experimentelle Methoden und Algorithmen</b> . . . . .	<b>25</b>
3.1 Werkstoffe . . . . .	25
3.1.1 Werkstoffauswahl . . . . .	26
3.1.2 Charakterisierung metallischer Pulverwerkstoffe . . . . .	27
3.2 Charakterisierung der Anlagenoptik . . . . .	29
3.2.1 Strahlkaustik . . . . .	30
3.2.2 Laserleistungsmessung . . . . .	30
3.2.3 Prozess-Parameter für das Prozess-Toleranzband . . . . .	31
3.2.4 Feldentzerrung des Galvanometer-Scanners . . . . .	32
3.3 Produktionsfehleranalyse mittels lateraler Prozessüberwachung . . . . .	33
3.3.1 Laterale Prozessüberwachung: Systembeschreibung . . . . .	34
3.3.2 Manuelle Klassifizierung von Fehlerbildern . . . . .	36
3.3.3 Automatische Klassifizierung von Schichtbildern . . . . .	36
3.3.4 Fehleranalyse unterschiedlicher Baujobs . . . . .	40
3.3.5 Fehleranalyse eines Serienbauteils . . . . .	40

3.4	Beschreibung des koaxialen Überwachungssystems . . . . .	40
3.4.1	Systemtechnik . . . . .	40
3.4.2	Abbildungsverhältnis . . . . .	44
3.4.3	Datenstruktur . . . . .	47
3.5	Einzelspur-Untersuchungen zur koaxialen Prozessüberwachung . . . . .	49
3.5.1	Experimenteller Umfang . . . . .	50
3.5.2	Auswertungs-Algorithmen . . . . .	55
3.6	Volumenkörper-Untersuchungen mittels koaxialer Prozessüberwachung . . . . .	58
3.7	Anwendungs-Untersuchungen zur koaxialen Prozessüberwachung . . . . .	60
3.7.1	Statistische Prozesskontrolle durch Schichtmittelwerte . . . . .	60
3.7.2	Untersuchungen zu Kanalbauteilen . . . . .	61
3.7.3	Spritzer-Signaturen . . . . .	62
3.7.4	Detektion und Laserpolieren von Oberflächen- Rauheit . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Ergebnisse . . . . .</b>	<b>65</b>
4.1	Fehleranalyse und laterale Prozessüberwachung . . . . .	65
4.1.1	Porosität und Härte . . . . .	65
4.1.2	Oberflächenrauheit . . . . .	66
4.1.3	Scannersystem . . . . .	68
4.1.4	Software-Fehler . . . . .	69
4.1.5	Fehlerbild-Klassifizierung mittels Neuronaler Netze	69
4.1.6	Zusammenfassung zur Fehleranalyse . . . . .	70
4.2	Signalverständnis der koaxialen Prozess-Überwachung . .	71
4.2.1	Einzelspur-Untersuchungen . . . . .	71
4.2.2	Umgebungsvariation der Interaktionszone . . . . .	78
4.2.3	Aufbau dünner Wände . . . . .	81
4.2.4	Unterscheidbarkeit aufgenommener Kamerabilder	82
4.2.5	Zusammenfassung zur Signalanalyse . . . . .	83
4.3	Prozess-Parameter-Variationen an Volumenkörpern . . . .	85
4.3.1	Ergebnisse aus Schichtbild-Daten . . . . .	85
4.3.2	Schmelzbad-Überwachung und Defekt-Generation	88
4.3.3	Einfluss der Partikelgrößenverteilung . . . . .	92
4.3.4	Erkenntnisse der Untersuchungen an Volumenkörpern	94
4.4	Fehler-Klassifizierung aus der manuellen Bildstapel-Analyse	95

4.5	Ergebnisse zur Nutzbarmachung . . . . .	101
4.5.1	Statistische Prozesskontrolle . . . . .	101
4.5.2	Signaturtiefe bei der Analyse von Kanaltestkörpern . . . . .	102
4.5.3	Spritzer-Signaturen . . . . .	106
4.5.4	Topographie-Evaluierung und Laserpolieren . . . . .	110
5	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>115</b>
6	<b>Summary . . . . .</b>	<b>119</b>
7	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>123</b>
7.1	Arbeitssicherheit . . . . .	123
7.2	Grundlagen . . . . .	124
7.2.1	Gaußsches Strahlprofil . . . . .	124
7.2.2	Numerische Simulation . . . . .	124
7.2.3	Einflussfaktoren beim Laserstrahl-Schmelzen . . . . .	126
7.2.4	Koaxiale Detektion: Grenzflächen und Einflüsse . . . . .	130
7.3	Messmittel und Geräte . . . . .	130
7.3.1	Pulvercharakterisierung . . . . .	130
7.3.2	Laserleistungs-Messgerät . . . . .	130
7.3.3	Laserspot-Monitor . . . . .	131
7.3.4	Handgerät zur Feuchtigkeitsmessung . . . . .	132
7.3.5	Schmelzbad-Überwachung: CMOS-Kamera . . . . .	132
7.4	Parameter . . . . .	133
7.4.1	Signalverhalten beim Aufbau dünner Wände . . . . .	133
7.4.2	Fraktionierte AlSi10Mg Pulver . . . . .	133
7.4.3	Umgebungsvariation der Interaktionszone . . . . .	134
7.4.4	Parameterfenster der Volumenkörper . . . . .	134
7.4.5	Überhang-Optimierung . . . . .	135
7.4.6	Zerspante raue Oberflächen . . . . .	135
7.4.7	Vorversuche der Oberflächen-Evaluierung . . . . .	136
7.4.8	Volumenkörper und Spritzer Detektion . . . . .	136
7.5	Zusatzmaterial . . . . .	137
7.5.1	Testteil-Geometrien . . . . .	137
7.5.2	Bauplattform mit Kanalbauteilen . . . . .	137
7.5.3	Koaxial sichtbare Spritzerentstehung . . . . .	138
7.5.4	Daten-Analyse-Protokoll . . . . .	138
7.6	Ergebnisse . . . . .	139
7.6.1	Pulvercharakterisierung . . . . .	139
7.6.2	Schlüsselwortsuche zur Prozessüberwachung . . . . .	140
7.6.3	Beobachtungen zur Oberflächenrauheit . . . . .	140

7.6.4	Positionsabhängige Laserleistungsmessung . . . . .	141
7.6.5	Einzelspurversuche mit AlSi0Mg . . . . .	141
7.6.6	Einzelspuren auf 1.4404 Testkörpern . . . . .	142
7.6.7	EDX-Vergleich von 1.4404 Oberflächen . . . . .	142
7.6.8	Einzelspurversuche mit dem Edelstahl 1.4057 . . . . .	142
7.6.9	Einfluss der Pulverwerkstoffe . . . . .	143
7.6.10	Härtemessung beim Werkzeugstahl 1.2709 . . . . .	144
7.6.11	Positionsabhängige Dichte beim Werkzeugstahl 1.2709	144
7.6.12	EDX-Messung an Fehlstellen . . . . .	145
7.6.13	Spritzer-Signaturen . . . . .	145
7.7	Auszug geförderter Projekte zur Prozessüberwachung . . .	146
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>		<b>147</b>