

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
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
3 Werkstoffe, Anlagentechnik, experimentelle Methoden und Algorithmen	25
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
4	Ergebnisse	65
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	Zusammenfassung	115
6	Summary	119
7	Anhang	123
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 AlSi10Mg	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	Härtmessung 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
Literaturverzeichnis		147