

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Ausgangssituation und Problemstellung	3
3	Zielsetzung	7
4	Stand der Wissenschaft und Technik	9
4.1	Verfahrensprinzip des Laser Powder Bed Fusion	9
4.2	Einflussgrößen und Prozesskenngrößen beim PBF	10
4.3	Grundlagen der Schmelzspurbildung beim PBF	12
4.3.1	Reflexionsgrad von Pulver, Schmelze und Substratwerkstoff	12
4.3.2	Schmelzgeometrien bzw. Schmelzregime	14
4.3.3	Spurbildung und deren Qualität beeinflussende Effekte	16
4.4	Charakterisierung von Einzelpuren, Einzelschichten und Volumenkörpern	25
4.4.1	Einzelpuren	25
4.4.2	Einzelschichten	31
4.4.3	Volumenkörper	33
4.5	Verfahrensparameter für die Werkstoffe AlSi10Mg, IN718 und 1.4404	41
4.6	Reproduzierbarkeit und Anlagenübertragbarkeit	42
4.7	Zwischenfazit	44
5	Vorgehensweise	47
5.1	Identifikation und Auswahl der betrachteten PBF-Einflussgrößen	47
5.2	Untersuchungen der Einfluss-Wirk-Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und Ausprägung der Einzelpuren	51
5.3	Untersuchungen zur Übertragung der Ergebnisse der Einzelpuren auf Einzelschichten und Volumenkörper	51
5.4	Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine zweite Anlage	52
5.5	Ableitung von Maßnahmen zur Verbesserung der Qualität von PBF-Probekörpern	52
6	Anlagentechnik und Analysemethoden und -geräte	53
6.1	Anlagentechnik	53
6.1.1	PBF-Laboranlage	53
6.1.2	SLM 280 HL	55
6.2	Analysemethoden und -geräte	56

7	Verfahrensparameter, Probengeometrien und verwendete Pulverwerkstoffe	61
7.1	Verfahrensparameter	61
7.1.1	Laserleistung P_L	61
7.1.2	Scangeschwindigkeit v_s	62
7.1.3	Strahldurchmesser d_s	62
7.1.4	Schichtdicke D_s	62
7.1.5	Belichtungsstrategie	62
7.2	Probengeometrien	64
7.2.1	Einzelsspuren	64
7.2.2	Einzelschichten	65
7.2.3	Volumenkörper	66
7.3	Verwendete Pulverwerkstoffe	66
8	Analyse von Einzelsspuren und Definition Stabilitätsfaktor S_f	71
8.1	Charakterisierung von Anlagen und Werkstoff	71
8.1.1	Betrachtung der Intensität und Streckenenergie	71
8.1.2	Position im Bauraum	72
8.1.3	Scanrichtung bezüglich der Schutzgasströmung	73
8.1.4	Reflexionsgrad der Werkstoffe	73
8.1.5	Fokusshift	75
8.2	Stabilitätsfaktor	76
8.3	Einzelsspuren auf der Substratplatte	78
8.4	Umschmelzen von AlSi10Mg-Einzelsspuren ohne Pulver	79
8.5	Umschmelzen von AlSi10Mg-Einzelsspuren mit Pulver	85
8.6	Definition der Grenzwerte für Stabilitätsfaktoren	95
8.7	Auswahl und Vergleich von Ausgangsparametern der Einzelsspuren mit Pulver der Werkstoffe AlSi10Mg, IN718 und 1.4404	95
9	Variation von Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf Einzelsspuren aus AlSi10Mg, IN718 und 1.4404	101
9.1	Homogenität und Untergrund der Pulverschicht	102
9.1.1	Untergrund der Pulverschicht	102
9.1.2	Einfluss der Pulverauftragseinheit auf die Einzelsspuren	110
9.1.3	Einfluss einer Pulverfixierung auf die Einzelsspuren	116
9.2	Werkstoff	118
9.2.1	Vergleich der AlSi10Mg, IN718 und 1.4404 Einzelsspuren	118
9.2.2	Einfluss der chem. Zusammensetzung am Beispiel der Dotierung von 1.4404 mit Kupfer	120
9.2.3	Einfluss des Substratplattenwerkstoffes	122
9.2.4	Einfluss der Pulvereigenschaften	123
9.3	Einfluss unterschiedlicher Schutzgase	127
9.4	Verfahrensparameter	128
9.4.1	Laserleistung	128

9.4.2	Scangeschwindigkeit	131
9.4.3	Strahldurchmesser	131
9.4.4	Pulverschichtdicke	134
9.4.5	Scanrichtung	135
9.5	Referenzparameter	136
9.6	Zwischenfazit	138
10	Übertragung der Ergebnisse von Einzelpuren auf Einzelschichten und Volumenkörper	143
10.1	Voruntersuchungen	143
10.1.1	Position im Bauraum und Belichtung von Einzelschichten und Volumenkörpern	143
10.1.2	Fokusshift und thermische Effekte bei Einzelschichten und Volumenkörpern	144
10.1.3	Auswahl der Verfahrens- und Messparameter	145
10.2	Übertragung der Ergebnisse von Einzelpuren auf Einzelschichten und Volumenkörper	147
10.3	Stabilitätsfaktoren, Rauheiten und Dichten der PBF-Probekörper in Abhängigkeit von der Belichtungsstrategie	156
10.4	Zwischenfazit	163
11	Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen unterschiedlichen PBF-Anlagen	165
11.1	Vergleich der Einflussgrößen und Verfahrensparameter für die Laboranlage mit der SLM 280 Anlage	165
11.1.1	Laserstrahlquelle	165
11.1.2	Verwendeter Pulverwerkstoff	167
11.1.3	Pulverauftrag	167
11.1.4	Schutzgasführung	168
11.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse für Einzelpuren	168
11.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse für Einzelschichten und Volumenkörper	174
11.4	Zwischenfazit	177
12	Ableitung von Maßnahmen zur Verbesserung der Bauteilqualität	179
12.1	Zusammenführung der Einflussgrößen/Verfahrensparameter für die Laboranlage	180
12.2	Festlegung der verbesserten Einflussgrößen/Verfahrensparameter für die SLM 280 Anlage	187
12.3	Verbesserte Einzelpuren und Würfel	189
12.4	Zwischenfazit	196

13	Zusammenfassung und Ausblick	199
14	Literatur	205
15	Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen	219
16	Anhänge	223
16.1	Anhang A1 Verwendete Werkstoffe und Korngrößenverteilungen der Pulver	223
16.2	Anhang A2 Charakterisierung der Laserstrahlquellen	229
16.3	Anhang A3 Charakterisierung der Einzelpuren für IN 718 und 1.4404	232
16.4	Anhang A4 Ergebnisse der Einflussgrößenvariation	241
16.5	Anhang A5 Stabilitätsfaktoren und Prozessfenster in Abhängigkeit der Einflussgrößen für beide Anlagen	261
16.6	Anhang A6 Definition verschiedener Rauheitskennwerte	264
17	Kurzzusammenfassung	267
18	Short Summary	269