

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Struktur der Arbeit	2
2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	5
2.1	Materialextrusion.....	5
2.1.1	Einordnung in die additive Fertigung.....	5
2.1.2	Verfahrensgrundlagen	9
2.1.3	Abgrenzung der kolbenbasierten Materialextrusion.....	13
2.1.4	Verfahrensspezifische Prozesskette	16
2.2	Metallpulverspritzguss	19
2.2.1	Einführung in den Pulverspritzguss	19
2.2.2	Feedstockherstellung	20
2.2.3	Spritzgießen.....	25
2.2.4	Entbindern	28
2.2.5	Sintern	29
2.2.6	Nacharbeit	31
2.3	Sinterbasierte Materialextrusion.....	32
2.3.1	Einordnung in die sinterbasierte additive Fertigung.....	32
2.3.2	Verfahrensgrundlagen	35
2.3.3	Anwendungsgebiete	37
2.3.4	Verfügbare Industrielösungen	38
3	Forschungsbedarf und Lösungsweg	41
3.1	Konkretisieren des Forschungsbedarfs	41
3.2	Darstellung des Lösungswegs	44
4	Methodische Anlagenentwicklung.....	47
4.1	Konstruktionsmethodisches Vorgehen	47
4.1.1	Aufgabenstellung	47
4.1.2	Typische FFF-Produktarchitektur	48
4.1.3	Bewertung der Bearbeitungstiefe	50
4.2	Modulentwicklung.....	52
4.2.1	Ergänzung der Aufgabenstellung	53
4.2.2	Konzeptphase	55
4.2.3	Entwurfsphase	58
4.2.4	Ausarbeitungsphase.....	61
4.3	Integration in digitale FFF-Prozesskette.....	64
4.3.1	Modellbildung.....	64
4.3.2	Firmware	68
4.3.3	Slicing-Software.....	71
4.4	Zusammenfassung	73

5	Experimentelle Prozessentwicklung	75
5.1	Methodische Prozessparameteridentifikation	75
5.1.1	Referenzfeedstock	75
5.1.2	Methodisches Vorgehen	76
5.1.3	Prozessparameteridentifikation	82
5.2	Eruieren der Füllstandabhängigkeit	87
5.2.1	Messaufbau	87
5.2.2	Untersuchung des Massenstroms	88
5.2.3	Untersuchung des Kraftverlaufs	90
5.3	Grenzwertbestimmung für Düsenreinigung	92
5.3.1	Quantifizierung des Materialüberschusses	92
5.3.2	Experimentelle Grenzwertbestimmung	94
5.4	Zusammenfassung	98
6	Anlagenspezifische Konstruktionsregeln	99
6.1	Identifizierung zu erarbeitender Konstruktionsregeln	99
6.2	Experimentelle Erarbeitung	101
6.2.1	Basiselemente: nicht gekrümmt – Höhe	101
6.2.2	Basiselemente: nicht gekrümmt – Länge	103
6.2.3	Basiselemente: nicht gekrümmt – Richtung	105
6.2.4	Basiselemente: einfach gekrümmt – Außendurchmesser	107
6.2.5	Basiselemente: einfach gekrümmt – Innendurchmesser	109
6.2.6	Basiselemente: einfach gekrümmt – Innendurchmesser ohne Supports	111
6.2.7	Basiselemente: einfach gekrümmt – Höhe	113
6.2.8	Elementübergänge: stofflos – Spaltbreite	114
6.2.9	Aggregierte Strukturen: Überhänge – Länge	116
6.2.10	Aggregierte Strukturen: Bauteiloberflächen – Oberflächenwinkel	117
6.3	Validierung der anlagenspezifischen Konstruktionsregeln	119
6.4	Zusammenfassung	121
7	Vergleich der Sinterteilqualität	123
7.1	Prüfkörperherstellung	123
7.2	Resultierende Bauteilqualität	125
7.2.1	Oberflächenrauheit	126
7.2.2	Maßhaltigkeit	129
7.2.3	Bauteildichte	132
7.2.4	Zugeigenschaften	135
7.3	Potenzialbewertung: Qualität	137
7.4	Zusammenfassung	140
8	Einsatz im MIM-Produktionsbetrieb	141
8.1	Demonstratorauswahl und -fertigung	141
8.2	Zeiteinsparungspotenzial	143
8.2.1	MIM-Produktentwicklung	143
8.2.2	Potenzialbewertung: Zeit	144
8.3	Kosteneinsparungspotenzial	146

8.3.1	Kostenmodell	146
8.3.2	Potenzialbewertung: Kosten	150
8.4	Zusammenfassung	152
9	Zusammenfassung und Ausblick	153
9.1	Zusammenfassung	153
9.2	Ausblick	155
10	Literaturverzeichnis	157
A	Anhang	181
A.1	Python-Skript zur Düsenreinigung	181
A.2	Erläuterung zur Bewertung der FDM-Konstruktionsregeln	183
A.3	Kalkulation der PFF-Grünteilkosten	190