

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung und Motivation .....	1
2 Stand der Technik .....	2
2.1 Additive Fertigung .....	2
2.2 Extrusionsbasierte additive Fertigungsverfahren .....	3
2.3 Kunststoff Freiformen .....	3
2.3.1 Verfahrensprinzip und Maschinenkomponenten.....	3
2.3.2 Prozessparameter .....	6
2.3.2.1 Schichtdicke .....	6
2.3.2.2 Formfaktor.....	7
2.3.2.3 Überlappung .....	7
2.3.2.4 Rasterwinkel und Rasterfolgewinkel.....	8
2.3.2.5 Bauteilorientierung .....	8
2.3.2.6 Prozesstemperaturen.....	9
2.3.2.7 Dosievolumen .....	9
2.3.2.8 Staudruck.....	10
2.3.2.9 Austragswert .....	10
2.3.3 Verfügbare Werkstoffe .....	10
2.3.4 Materialqualifizierung (Standardvorgehen) .....	11
2.3.5 Einflussgrößen auf die resultierende Bauteilqualität.....	13
2.3.5.1 Mechanische Bauteileigenschaften .....	13
2.3.5.2 Geometrische Bauteileigenschaften .....	15
2.3.5.3 Transferfähige Einflussgrößen aus dem FDM.....	15
2.4 Forschungsbedarf und Zielsetzung .....	16
3 Fertigungsrandbedingungen im Kunststoff Freiformen.....	19
3.1 Beeinflussbare Fertigungsrandbedingungen.....	19
3.1.1 Formfaktor .....	19
3.1.1.1 Wellenbildung auf der Bauteiloberfläche .....	20
3.1.1.2 Geometrieabhängiger Formfaktor.....	21
3.1.1.3 Verschiedene Formfaktoren in einem Fertigungsauftrag .....	23
3.1.2 Austragswert .....	25
3.1.2.1 Untere Grenze des Austragswertes.....	25
3.1.2.2 Toleranzband des Austragswertes .....	25
3.1.3 Weitere Prozessparameter .....	27
3.1.3.1 Zonen der Zylindertemperierung .....	27
3.1.3.2 Bauraumtemperatur .....	28
3.1.3.3 Staudruck.....	28

3.1.3.4	Schichtdicke.....	29
3.1.3.5	Überlappung zwischen Raster- und Konturlinien .....	29
3.1.4	Einfluss der Schichtzeit.....	30
3.1.4.1	Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften.....	31
3.1.4.2	Einfluss auf die geometrischen Bauteileigenschaften .....	33
3.2	Nicht beeinflussbare Fertigungsrandbedingungen.....	34
3.2.1	Düsenverschleiß.....	34
3.2.2	Untersuchung der Temperaturverteilung auf der Bauplattform .....	37
3.2.2.1	Vorgehensweise bei der Temperaturermittlung.....	38
3.2.2.2	Auswertung der Temperaturverteilung auf der Bauplattform	40
3.2.2.3	Welligkeit von Probekörpern in der Z-Bauteilausrichtung.....	43
3.2.3	Verweilzeit im schmelzeförmigen Zustand.....	45
3.2.3.1	Modellierung der Verweilzeit.....	46
3.2.3.2	Einflussgrößen auf die Verweilzeit.....	48
3.2.3.3	Strategien zur Minimierung der Verweilzeit .....	50
4	Untersuchung und Optimierung der mechanischen Bauteileigenschaften .....	52
4.1	Statistischer Versuchsplan zur Analyse ausgewählter Prozessparameter .....	52
4.1.1	Erstellung eines statistischen Versuchsplans .....	53
4.1.1.1	Auswahl und Definition der Faktorstufen .....	54
4.1.1.2	Herstellung der Probekörper.....	56
4.1.2	Auswertung der Prozessparametereinflüsse .....	57
4.1.2.1	Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul .....	58
4.1.2.2	Bruchdehnung.....	60
4.1.3	Optimierung der XY-Bauteilausrichtung.....	62
4.1.4	Modellvalidierung .....	63
4.2	Einfluss des Raster- und Rasterfolgewinkels .....	64
4.2.1	Herstellung und Untersuchung von Zugstäben.....	65
4.2.2	Verwendung einer plattenförmigen Probekörpergeometrie .....	67
4.3	Untersuchung und Optimierung der Z-Bauteilausrichtung .....	69
4.3.1	Analyse der mechanischen Eigenschaften der Z-Bauteilausrichtung .....	69
4.3.2	Optimierungsansätze .....	71
4.3.2.1	Steigerung des Tropfenvolumens.....	72
4.3.2.2	Verwendung eines wanddickenabhängigen Formfaktors.....	77
4.4	Fazit .....	80
5	Untersuchung und Optimierung der geometrischen Bauteileigenschaften.....	81
5.1	Theoretische Grundlagen .....	81
5.1.1	Schwindung im Allgemeinen .....	81
5.1.2	Einflussfaktoren auf die Schwindung in der additiven Fertigung .....	82
5.1.3	Schwindungskompensation im KF .....	83

---

5.2	Schwindungsverhalten von ABS-M30 im Kunststoff Freiformen.....	84
5.2.1	Prüfkonzept .....	85
5.2.2	Auswertung der Maßabweichungen von linearen Bauteilelementen.....	87
5.2.3	Analyse der prozessbedingten Einflussfaktoren im KF .....	89
5.2.3.1	Einfluss der Schichtzerlegung .....	89
5.2.3.2	Einfluss der ersten Bauteilschicht (Offset-Wert).....	92
5.2.3.3	Instabile Bauteilbereiche (Schwingungen) bei großen Probekörperlängen .....	93
5.2.3.4	Einfluss des Formfaktors .....	95
5.3	Optimierte Methode zur Bestimmung der Skalierungsfaktoren.....	95
5.3.1	Optimierung für die x- und y-Koordinatenrichtung .....	96
5.3.2	Optimierung für die z-Koordinatenrichtung .....	97
5.3.3	Optimierung der Berechnungsmethode .....	99
5.3.4	Validierung .....	100
6	Zusammenfassende Fertigungsrichtlinien .....	103
6.1	Optimierte Vorgehensweise für die Materialqualifizierung .....	103
6.1.1	Optimierter rechnerischer Formfaktor .....	107
6.1.1.1	Modellierung .....	108
6.1.1.2	Validierung .....	112
6.1.2	Mathematische Formfaktorstufenberechnung .....	115
6.1.2.1	Modellierung und Umsetzung .....	116
6.1.2.2	Validierung .....	119
6.1.3	Systematische Optimierung des Formfaktors .....	121
6.1.4	Vorteile der optimierten Vorgehensweise .....	124
6.2	Gezielte Prozessparameteroptimierung für ein spezifisches Bauteil .....	124
6.2.1	Düsentemperatur.....	125
6.2.2	Formfaktor .....	126
6.2.3	Weitere Einflussfaktoren .....	127
6.2.4	Konstruktive Fertigungsrichtlinien .....	128
7	Zusammenfassung.....	129
8	Ausblick .....	131
	Literaturverzeichnis .....	132
	Anhang 139	
A1	Technische Materialdatenblätter .....	139
A2	Prozessparameter .....	142
A3	Einfluss der Schichtzeit auf die mechanischen Bauteileigenschaften.....	144
A4	Optimierung der mechanischen Eigenschaften in Z-Bauteilausrichtung.....	145

A5 Geometrische Bauteileigenschaften - Probekörpergeometrien .....	147
A6 Optimierte Methode zur Bestimmung der Skalierungsfaktoren.....	149