

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	V
Zusammenfassung.....	VIII
Abstract.....	X
Kapitel 1. Motivation, Ziele und Gliederung der Dissertation.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Methodik, Ziele und Gliederung der Dissertation	5
Kapitel 2. Stand der Technik.....	13
2.1 Additive Fertigung mit faserverstärkten Werkstoffen	13
2.1.1 Photopolymerisation im Bad	13
2.1.2 Binder-Jetting-Verfahren und Pulverbettbasiertes Schmelzen	16
2.1.3 Material-Jetting-Verfahren und gerichtete Energiedeposition.....	19
2.1.4 Sheet-Lamination-Verfahren (dt. Schichtlaminierung).....	22
2.1.5 Materialextrusionsverfahren	24
2.1.6 Vergleich der Faserlänge und -orientierung in der Additiven Fertigung.....	26
2.2 Endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe mit der Materialextrusion	28
2.2.1 Einteilung nach Ausgangsmaterialien.....	28
2.2.2 Technologien mit vorinfiltriertem Faserroving im Filament.....	29
2.2.3 Verfahren mit Fasern oder Pulver als Matrixmaterial in den Verstärkungsfasern	35
2.2.4 Verfahren mit getrennter Faser- und Matrixpolymerzuführung	38

XIII

2.2.5	Weitere Ansätze zur additiven Herstellung von endlosfaserverstärkter Verbundwerkstoffen.....	41
2.2.6	Gegenüberstellung und Bewertung von AM Verfahren für Verbundwerkstoffe mit endlosen Fasern	45
2.3	Herstellungstechnologien für thermoplastische Faserverbundwerkstoffe.....	48
2.3.1	Pultrusion von thermoplastischen Verbundwerkstoffen.....	48
2.3.2	Automated Fiber Placement mit thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen.....	56
2.4	Faser-Matrix-Anbindung in thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen.....	59
2.4.1	Adhäsion und Kohäsion	59
2.4.2	Messverfahren zur Analyse der Oberflächeneigenschaften	66
Kapitel 3.	Untersuchungsverfahren.....	73
3.1	Mikroskopie.....	73
3.2	Stereomikroskopie	73
3.3	Rasterelektronenmikroskopie	74
3.4	Bestimmung Benetzungsverhalten von Kohlenstofffasern und Thermoplastschmelze.....	74
3.5	Röntgenphotoelektronenspektroskopie	76
3.6	Thermogravimetrische Analyse.....	77
3.7	Fourier-Transform Infrarot-Spektroskopie.....	77
3.8	Restfeuchtigkeitsbestimmung	77
3.9	Bestimmung der Viskositätszahl.....	78

3.10	Schmelze-Massenfließrate und Schmelze-Volumenfließrate (MFR/MVR)	78
3.11	Mechanische Untersuchung der additiv gefertigten PA6 Probekörper.....	79
3.12	Mechanische Untersuchungen der additiv gefertigten Verbundwerkstoffe	81
Kapitel 4.	Werkstoffauswahl.....	86
4.1	Auswahl der Fasern- und Matrixkombination ..	86
4.2	Auswahl der PA6 Granulate und Kohlenstofffasern.....	94
4.3	Benetzung der ausgewählten Fasern und Thermoplaste.....	97
4.4	Berechnung der Verbundeigenschaften	101
4.4.1	Auswahl der Fasergarnstärke nach Geometrierandbedingungen und Verbundmaterialkosten.....	101
4.4.2	Berechnung der Geometrieparameter für 3k Fasern.....	105
4.4.3	Berechnung der mechanischen Eigenschaften durch die mikromechanischen Mischungsregeln.....	109
Kapitel 5.	Oberflächencharakterisierung der Kohlenstofffasern.....	113
5.1	Oberflächenmorphologie der ausgewählten Fasern	113
5.2	Chemische Zusammensetzung der Faseroberfläche.....	117
5.3	Temperaturstabilität der Faserschlichte.....	125

Kapitel 6.	Filamentextrusion und Optimierung der Fließfähigkeit	133
6.1	Verarbeitungseigenschaften der verwendeten Polyamid 6 Granulate	133
6.1.1	Restfeuchtigkeit bei Polyamid 6.....	133
6.1.2	Temperaturstabilität von Polyamid 6.....	134
6.1.3	Rheologische Eigenschaften der Thermoplastschmelzen (PA6)	138
6.2	Analyse des Slicing-Prozesses und Bildung des Massenstrommodells.....	148
6.3	Filamentextrusion	153
6.3.1	Optimierung des Extrusionsprozesses und Einfluss auf den Filamentdurchmesser	155
6.3.2	Additive Fertigung mit den extrudierten PA6 Filamenten mit niedriger Fließfähigkeit.....	164
6.3.3	Mechanische Eigenschaften der Polyamid 6 Probekörper	166
Kapitel 7.	Design und Funktion des Druckkopfes.....	170
7.1	Infiltrationsmechanismus durch Umlenkung des Faserstranges.....	170
7.2	Druckkopfdesign zur Herstellung von Faserverbundwerkstoffen.....	177
Kapitel 8.	Mechanische und optische Charakterisierung von additiv gefertigten Faserverbundwerkstoffen.....	184
8.1	Additive Fertigung der Verbundprobekörper..	184
8.2	Einfluss der Lagenhöhe auf die mechanischen Eigenschaften im 3-Punkt-Biegeversuch.....	186

8.3	Einfluss der Verarbeitungstemperatur auf die 3-Punkt-Biegeeigenschaften	198
8.4	Zugversuche an Einzelstrangproben in Abhängigkeit von der Verarbeitungstemperatur.....	205
8.5	Bestimmung der Verbundeigenschaften im Zugversuch optische Untersuchung.....	211
Kapitel 9. Zusammenfassung und Ausblick.....		218
Literaturverzeichnis.....		225
Abkürzungen		255
Symbole.....		260
Auflistung der verwendeten industriellen Programme und Maschinen.....		264
Abbildungsverzeichnis.....		266
Tabellenverzeichnis.....		278
Veröffentlichungen.....		283