

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation: Design for Additive Manufacturing.....	1
1.2 Aufbau und Ziel der Arbeit	3
1.3 Eigenanteil an Publikationen.....	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Additive Fertigung: Definition und Merkmale	7
2.1.1 Additive Fertigungsverfahren	8
2.1.1.1 Laserbasierte Verfahren	8
2.1.1.2 Extrusionsbasierte Verfahren.....	12
2.1.1.3 Weitere Verfahren.....	14
2.1.1.4 Überblick und Gegenüberstellung.....	15
2.1.1.5 Eignung verschiedener AM-Verfahren für die Herstellung von Faserverbundbauteilen	17
2.1.2 Design for Additive Manufacturing (DfAM)	20
2.1.2.1 Designbezogene Chancen, Vorteile und Möglichkeiten durch Additive Fertigung.....	22
2.1.2.2 Einschränkungen durch AM und Qualitätserwägungen in der additiven Fertigung	23
2.1.2.3 Typische Zielkriterien und Prozessattribute von AM ...	25
2.1.3 Standards und Normen	27
2.2 FLM mit kurzfaserverstärktem Filament	31
2.2.1 Wichtigste Parameter im Preprocessing, Processing und Postprocessing sowie aktuelle Herausforderungen	31
2.2.2 Kunststofftechnische Eigenschaften.....	32
2.2.2.1 Anforderungen an faserverstärktes FLM-Material.....	33
2.2.2.2 Überblick über Eigenschaften von FLM-FKV-Werkstoffen	34
2.2.3 Pfadgenerierung für unterschiedliche Zielkriterien.....	37
2.3 Strukturmechanische Simulation von FLM	40

2.3.1	Materialmodelle auf der Mikro- und Makrostruktur-Ebene und ihr Einsatz in Berechnungsverfahren.....	40
2.3.2	Existierende Berechnungsverfahren.....	44
2.4	Strukturoptimierung	46
2.4.1	Simulationsgestützter Optimierungsprozess.....	46
2.4.2	Typen der simulationsbasierten Strukturoptimierung... ..	47
2.4.2.1	Dimensionierung (Sizing).....	47
2.4.2.2	Formoptimierung	47
2.4.2.3	Topologieoptimierung	48
2.4.3	Spezielle Optimierungsverfahren für AM	56
2.4.4	Diskussion der AM-Optimierungsverfahren.....	60
2.5	Nutzenpotenzial und Handlungsbedarf.....	62
2.5.1	Ableitung der Ziele und Forschungsumfeld.....	62
2.5.2	Erforschung.....	64
2.5.3	Anforderungen und Evaluierung	64
3	Ansatz zur kraftflussgerechten Auslegung von FLM-Faserverbundbauteilen.....	67
3.1	Optimierung	68
3.1.1	Berechnung der Baurichtung	69
3.1.1.1	Einführung der Baurichtungsorientierung.....	69
3.1.1.2	Demonstration an einem einfachen Demonstrator.....	72
3.1.2	Erzeugung lastpfadgerechter Materialorientierung und Materialverteilung durch Topologieoptimierung mit anisotropem Materialmodell.....	76
3.1.2.1	Berechnung der lokalen Materialorientierung.....	78
3.1.2.2	Berechnung der Materialverteilung (Pseudodichten) ...	81
3.1.2.3	Filter und Penalisation	83
3.1.2.4	Abbruchkriterium bzw. Konvergenzkriterium	85
3.1.2.5	Einfluss der Projektion von Hauptspannungsrichtungen und Studie zu aufsteigenden E-Moduln in z-Richtung	86
3.1.3	Optimierung eines 2D-FLM-Bauteils	87
3.1.3.1	Berücksichtigung der Orthotropie	87
3.1.3.2	Filter und Penalisation	89
3.1.4	Erweiterung auf Mehrlastfalloptimierung.....	92
3.2	Pfadgenerierung	92
3.2.1	Konturfindung durch Alpha-Shapes.....	93
3.2.1.1	Konturfindung	93

3.2.1.2	Entfernung von Schleifen bei der Generierung von Mehrfachwandungen	96
3.2.2	Infill-Pfadgenerierung durch Clustering, lokal lineare Approximation und B-Splines zur Verbindung.....	99
3.2.2.1	Clustering und Einzelpfadgenerierung.....	99
3.2.2.2	Zuordnungsalgorithmus für Einzelpfadsegmente, B-Spline-Interpolation	102
3.2.2.3	Sortieralgorithmus zur Travel-Reduktion	104
3.3	Strukturmechanische FLM-Simulation	105
3.3.1	CAD- und FE-Modell des Bauteils	106
3.3.2	Erzeugte Building Source	107
3.3.3	Mapping, Simulationsmodell und Ergebnisse.....	108
3.3.4	Vergleich unterschiedlicher Infill-Muster	110
3.3.5	Einordnung des Simulationsansatzes.....	111
3.4	Experimentelle Kalibrierung und Validierung eines Materialmodells für FLM-FKV (PETG-CF20)	111
3.4.1	Vorgehen.....	111
3.4.2	Ergebnisse der Kalibrierung.....	115
3.4.3	Ergebnisse der Validierung	121
4	Demonstration des Ansatzes anhand eines Tragwerkknottens	125
4.1	Baurichtungsoptimierung	126
4.2	Topologieoptimierung	129
4.3	Pfadgenerierung	130
4.3.1	Konturgenerierung	131
4.3.2	Infill-Pfadgenerierung	133
4.3.2.1	Zuweisung von Hauptspannungen zu Schichten / Clustering	133
4.3.2.2	Erstellung eines Rasters als Ausgangspunkt für die Pfadgenerierung	137
4.3.2.3	Kraftflussgerechte Infillpfad-Generierung	138
4.4	Vorbereitung und Durchführung des FLM-Drucks	141
4.4.1	Generierung der Building Source mit Stützstrukturen...141	141
4.4.2	Modifikationen am Drucker und Druck.....	142
4.5	Simulationsbasierte Untersuchung des Ergebnisses	143

5	Diskussion der Ergebnisse.....	149
5.1	Baurichtung	149
5.2	Topologieoptimierung	150
5.3	Simulation	151
5.4	Pfadgenerierung	152
5.5	Druck	152
5.6	Leichtbaupotenzial.....	153
6	Zusammenfassung und Ausblick	155
6.1	Zusammenfassung.....	155
6.2	Ausblick und einfache Konstruktionsregeln.....	157
7	Summary and outlook.....	159
7.1	Summary.....	159
7.2	Outlook and practical design rules.....	161
Anhang.....	163	
Anhang 1.	Gegenüberstellung von AM-Verfahren.....	163
Anhang 2.	Materialeigenschaften verschiedener FLM-Faser-Matrix-Kombinationen	167
Anhang 3.	Diskussion der Steifigkeitsoptimalität der Ausrichtung nach Hauptnormalspannungstrajektorien bei linear elastischem Material.....	170
Literaturverzeichnis	175	