

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnisix
Bildverzeichnis xiii
Tabellenverzeichnisxix

1 Einleitung1

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 Fertigungsverfahren8

2.1.1.1 Laserbasierte Verfahren8

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 Faserverbundbauteilen17

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 Tragwerkknotens	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
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