

1 Einleitung	1
2 Wissensstand zur Kombination von Automated Fiber Placement (AFP) und Additive Layer Manufacturing (ALM)	3
2.1 AFP/ALM-Grundlagen	3
2.1.1 Halbzeuge für automatisierte Ablegeverfahren	4
2.2 Prozessvergleich Duroplast-/Thermoplast-Tapelegen	4
2.3 Potenzial und Prinzip des Thermoplast-Tapelegeverfahrens	6
2.4 Entwicklungsstand zum Tapelegen	7
2.5 Eignung des 3D-Drucks mit endlosfaserverstärkten Kunststoffen für die Kombination mit AFP	8
2.6 Entwicklungsstand zum 3D-Druck mit endlosfaserverstärkten Kunststoffen	10
2.7 Zielsetzung und Fazit aus dem Wissensstand	11
3 Methodische Prozessanalyse der Kombination von AFP und ALM	13
3.1 Überblick über die wichtigen Funktionsgruppen im AFP-Kopf	13
3.2 Herausforderungen im Tapelegeprozess	15
3.2.1 AFP-Ablegestrategien	16
3.2.2 Drapierbarkeit im Ablegeprozess	17
3.2.3 Lücken und Überlappungen beim Ablegen	17
3.2.4 Herausforderung der ersten Schicht beim Thermoplast-Tapelegen	18
3.2.5 Einfluss der AFP-Prozessparameter auf die Laminatqualität	19
3.2.6 Analyse und Einfluss von Prozessparametern auf den 3D-Druck mit kontinuierlichen Kohlenstofffasern	20
3.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse	21

4 Konzeptentwicklung für den Tapelegekopf und den 3D-Druckkopf	23
4.1 Vorschubtechnologie	23
4.2 Materialvorrat	26
4.3 Spulensicherungseinheit	27
4.4 Tapevorschubstrategie	29
4.5 Antriebsart der Vorschubeinheit	32
4.6 Tapespannung beim Ablegeprozess	33
4.7 Grundsatz des Schneidsystems	34
4.8 Grundprinzip des Heizsystems	36
4.9 Konsolidierungssysteme	39
4.10 Grundlegendes Konzept des 3D-Drucks mit CFK Filament	41
4.11 Zusammenfassung der Erkenntnisse	42
5 Realisierung und Integration des Tapelegekopfs und des 3D-Druckkopfs	43
5.1 Vorschub mit integrierter Schneideeinheit des Ablegekopfs	43
5.1.1 Experimentelle Untersuchung des Vorschubs mit integriertem Schneidsystem	47
5.2 Konsolidierungseinheit und Heizquelle der AFP	47
5.3 Online-Überwachung und Inspektion des AFP mittels neuronaler Netze und maschinellen Lernens	50
5.3.1 Umsetzung eines Online Monitoring and Modeling System (OMMS) mittels Laser Profile Scanner	51
5.3.2 Lückenerkennung mittels SiamMask-Netzwerk	52
5.4 3D-Druck mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff	53
5.4.1 Multifilament-3D-Druck mit kontinuierlicher Kohlenstofffaser	53
5.4.2 Einzelfilament-3D-Druck mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff	55
5.5 Integration des ALM-Moduls in den AFP-Kopf	55
5.6 Ergänzende Entwicklungsmöglichkeiten für das AFP/ALM	56
5.6.1 Anordnung der AFP/ALM-Anlage auf dem Roboterflansch	56
5.6.2 Anordnung des Vorschub- und des Schneidsystems	57
5.6.3 In-situ-Konsolidierung von thermoplastischem Prepreg durch Generierung harmonischer Schwingungen auf der Konsolidierungsrolle	58
5.6.4 Entwurf eines aktiven, düsenlosen 3D-Druckkopfs für thermoplastische kontinuierliche Kohlenstofffasern	61
5.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse	62

6 Steuerung und Regelung des Tapelegekopfs mit integriertem 3D-Druckkopf an einem sechsachsigen Roboter	63
6.1 Prozessablauf und Kopplung des AFP/ALM-Prozesses	63
6.1.1 Prozessablauf des AFP-Verfahrens	64
6.1.2 Prozessablauf des ALM-Verfahrens.	65
6.1.3 AFP/ALM-Flussdiagramm und -Steuerungskonzept	66
6.2 Regelungskonzept und technische Umsetzung der implementierten Einheiten.	66
6.2.1 Regelung der Vorschub- sowie der Spuleneinheit	66
6.2.2 Temperaturregelung des Luftheizers	69
6.2.3 Regelung der Konsolidierungseinheit	70
6.2.4 Regelung des CFK-3D-Druckkopfs.	71
6.2.5 Netzwerkstruktur zur Regelung des AFP/ALM-Kopfs.	72
6.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse	74
7 AFP/ALM-Prozesse auf doppelt gekrümmten Oberflächen	75
7.1 Beheizbares Werkzeug für den gesamten Prozess	75
7.2 Bahnprogrammierung für den AFP-Prozess	76
7.2.1 Methodisches Ablaufdiagramm des FVK-Bauteils vom Entwurf bis zum Roboterbetrieb	78
7.3 Grundsätze und Aufbau des SPS-Programms für den AFP/ ALM-Prozess	81
7.4 Lückenerkennung im AFP-Prozess durch gradientenbasierte Kantenerkennung	83
7.4.1 Experimentelle Untersuchung der Lückenerkennung mit verschiedenen Konfigurationen von Tapes	84
7.5 Automatische Generierung von 3D-Druckbahnen.	85
7.5.1 Automatische Generierung von 3D-Druckbahnen (G-Codes) für dreiachsige 3D-Drucker	85
7.5.2 Automatische Generierung von 3D-Druckbahnen anhand von Lückendaten	87
7.5.3 ALM-Bahntransfer für Bearbeitungen mit sechsachsigen Robotern in RoboDK	88
7.6 Ablegeeffekte von CFK-Laminaten bei der In-situ-Konsolidierung.	89
7.6.1 Untersuchung der Ablegeeffekte von CFK-Laminaten mit einer Pressmaschine	92
7.7 Grundsätze und Realisierung der AFP/ALM-Anlage	93
7.8 Zusammenfassung der Erkenntnisse	94
8 Zusammenfassung und Ausblick	95
Anhang	99
Literatur	103