

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Preforms in der Produktion von Faserverbundkunststoffen</b>	<b>5</b>
2.1 Einführung und allgemeine Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen	5
2.1.1 Einsatzgebiete und Marktentwicklung . . . . .	6
2.1.2 Fasermaterialien . . . . .	8
2.1.3 Matrixsysteme . . . . .	11
2.1.4 Textile Halbzeuge . . . . .	12
2.2 Faserorientierungen von Preforms in der FVK-Fertigung . . . . .	13
2.2.1 Definitionen: Preform, Geometrie und Verstärkungsstruktur .	15
2.2.2 Verfahren zur Herstellung von Preforms . . . . .	16
2.2.3 2D- und 3D-Faserorientierung . . . . .	18
2.2.4 Artefakte und Fehlstellen . . . . .	19
2.3 Fazit . . . . .	21
<b>3 Machine-Vision-Systeme zur Messung der Faserorientierung</b>	<b>23</b>
3.1 Mess- und Prüfsysteme für Faserverbundkunststoffe . . . . .	23
3.2 Machine-Vision-Systeme . . . . .	25
3.2.1 Photometric Stereo . . . . .	25
3.2.2 Machine-Vision-Systeme mit statischer Beleuchtungsstrategie .	25
3.3 Bildauswertung und Messung der 2D-Faserorientierung . . . . .	26
3.3.1 Bildanalytische Verfahren . . . . .	26
3.3.2 Strukturtensoverfahren . . . . .	27
3.4 Erweiterungen zur Erfassung dreidimensionaler Preforms . . . . .	29
3.4.1 Handhabungssysteme zur Erfassung ganzer Preforms . . . . .	30
3.4.2 Optische Koordinatenmesstechnik zur Geometrieerfassung . .	32
3.4.3 Datenfusion und Berechnung der 3D-Faserorientierung . . . .	36
3.5 Fazit . . . . .	37

<b>4</b>	<b>Methodisches Vorgehen: Forschungsdesign</b>	<b>39</b>
4.1	Bestehendes Defizit und Forschungsbedarf . . . . .	39
4.2	Forschungsmethodik . . . . .	40
4.3	Konkretisierung der Forschungsfrage . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Robotergeführtes MVS zur Messung der 3D-Faserorientierung</b>	<b>43</b>
5.1	Anforderungen durch die Messaufgabe . . . . .	44
5.1.1	Aufgabenstellung . . . . .	44
5.1.2	Messobjekte . . . . .	45
5.1.3	Prozessintegration, Schnittstellen und Bedienung . . . . .	47
5.2	Komponenten des Machine-Vision-Systems . . . . .	47
5.3	Messprozessablauf . . . . .	48
5.4	Softwareauswertung und Datenfusion . . . . .	50
5.4.1	Linienlaser-Triangulation zur Geometrieerfassung . . . . .	50
5.4.2	2D- und 3D-Faserorientierung sowie Datenfusion . . . . .	52
5.5	Kalibrierung . . . . .	53
5.5.1	Kamerakalibrierung . . . . .	53
5.5.2	Linienlaserkalibrierung . . . . .	54
5.5.3	Hand-Auge-Kalibrierung . . . . .	56
5.6	Eingrenzung der Unsicherheitsbeiträge und Fazit . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Modellierung des Messsystems und der Messunsicherheit</b>	<b>59</b>
6.1	Methodisches Vorgehen . . . . .	59
6.2	Datenfusion zur 3D-Faserorientierung . . . . .	61
6.3	Geometrieerfassung mittels Linienlaser-Triangulation . . . . .	62
6.4	Lokale 2D-Faserorientierungsmessung . . . . .	63
6.5	Kalibrierverfahren . . . . .	63
6.6	Fazit . . . . .	65
<b>7</b>	<b>Quantifizierung der Einflussfaktoren und Unsicherheitsbeiträge</b>	<b>67</b>
7.1	Roboterposen . . . . .	68
7.2	Kamerakalibrierung . . . . .	71
7.3	Hand-Auge-Kalibrierung . . . . .	76
7.4	Kalibrierung der Laserebene . . . . .	78
7.5	Geometrieerfassung . . . . .	79
7.5.1	Absolute Koordinatenmessung . . . . .	79
7.5.2	Längenmessabweichung . . . . .	80
7.5.3	Ebenheitsmessabweichung . . . . .	82
7.6	2D-Faserorientierung . . . . .	83
7.7	3D-Faserorientierung . . . . .	87
7.8	Fazit . . . . .	90

---

<b>8 Vorhersagemodell zur Bestimmung der Messunsicherheit</b>	<b>93</b>
8.1 Translatorische Roboterbewegungen . . . . .	93
8.2 Dreh-Schwenk-Bewegungen . . . . .	95
8.3 Validierung . . . . .	96
8.4 Fazit . . . . .	99
<b>9 Messtechnische dreidimensionale Erfassung von CFK-Preforms</b>	<b>101</b>
9.1 Erkenntnisgewinn und Beantwortung der zentralen Forschungsfrage .	101
9.2 Kritische Reflexion . . . . .	102
9.3 Ausblick . . . . .	103
<b>10 Zusammenfassung</b>	<b>105</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>
<b>Eigene Publikationen</b>	<b>119</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>121</b>
<b>Abstract</b>	<b>123</b>