

# 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>