

I Inhaltsverzeichnis

Table of contents

I	Inhaltsverzeichnis	i
II	Abkürzungsverzeichnis	iii
III	Formelzeichen.....	vii
IV	Abbildungsverzeichnis.....	xiii
V	Tabellenverzeichnis	xvii
1	Werkstattgerechte Schadensanalyse von CFK-Strukturbauteilen	1
2	Schadensreparatur im Faserverbundleichtbau.....	5
2.1	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK).....	5
2.2	Marktentwicklung für CFK	7
2.3	Schäden in CFK-Strukturbauteilen.....	9
2.4	CFK-Reparatur im Automobilbau.....	11
2.5	Handlungsbedarf aus Sicht der CFK-Reparatur	14
3	Messtechnische Schadensanalyse von CFK-Strukturbauteilen.....	15
3.1	Tomografische Messverfahren für CFK-Strukturbauteile	15
3.2	Eignung der Messverfahren zur Schadensanalyse.....	20
3.3	Ultraschallmesstechnik zur Schadensanalyse	22
3.4	Ortungsverfahren für den Werkstatteinsatz	23
3.5	Unsicherheitsbestimmung der Ultraschallmesstechnik	25
3.6	Handlungsbedarf aus messtechnischer Sicht.....	30
4	Forschungsdesign und methodisches Vorgehen	31
4.1	Forschungsbedarf und forschungsleitende Fragen.....	31
4.2	Forschungsdesign und Aufbau der Arbeit.....	32
5	Konzeptionierung und Realisierung des optisch georteten Ultraschallmesssystems	37
5.1	Anforderungen an das optisch geortete Ultraschallmesssystem.....	37
5.2	Systemarchitektur und Komponenten.....	38
5.3	Prototypische Realisierung.....	43
5.4	Zwischenfazit zum optisch georteten Ultraschallmesssystem.....	47
6	Werkstattgerechte Schadensanalyse von CFK	49
6.1	Anforderungen an die werkstattgerechte Schadensanalyse	49
6.2	Verwendete CFK-Versuchsbauteile.....	50
6.3	Messprozess der werkstattgerechten Schadensanalyse	52
6.3.1	Bauteilkoordinatensystem und Messvorrichtung	52
6.3.2	3D-Oberflächenmodell des geschädigten CFK-Strukturbauteils	53

6.3.3	Parametereinstellungen der Messsysteme	54
6.3.4	Messdatenaufnahme.....	56
6.4	Modellbasierte Analyse der Ultraschallmessdaten	57
6.4.1	Modellierung der Intensitätsverteilung und Segmentierung.....	58
6.4.2	Detektion und Lokalisierung relevanter Peaks.....	60
6.4.3	3D-Rekonstruktion relevanter Peak-Positionen.....	62
6.4.4	Werkstattgerechte Aufbereitung der Schadensinformationen	64
6.5	Funktionsprüfung und Analyse der Schadensbilder	65
6.5.1	Funktionsprüfung anhand der Ultraschallpunktewolken	66
6.5.2	Schadensbilder der Impactplatten.....	68
6.6	Zwischenfazit zur werkstattgerechten Schadensanalyse.....	71
7	Unsicherheitsbetrachtung und Optimierung	73
7.1	Identifikation der Einflüsse auf die Messunsicherheit.....	74
7.2	Experimentelle Untersuchung der optischen Ortung	76
7.2.1	Versuchsaufbau und Versuchsplanung	77
7.2.2	Unsicherheitsbetrachtung.....	80
7.3	Parameteroptimierung der Phased-Array-Ultraschallmessung.....	83
7.3.1	Konzeptionierung und Aufbau des Versuchsstands.....	84
7.3.2	Erfassung und Verarbeitung der Ultraschallmessdaten.....	85
7.3.3	Screening-Experimente zur Signifikanzbewertung	88
7.3.4	Versuchsplanung und -durchführung im eingegrenzten Parameterraum.....	93
7.3.5	Messunsicherheitsbestimmung und Parameteroptimierung.....	96
7.4	Parameteroptimierung der werkstattgerechten Schadensanalyse.....	98
7.4.1	Versuchsaufbau und Versuchsplanung	98
7.4.2	Messunsicherheitsbestimmung und Parameteroptimierung.....	103
7.5	Oberflächenmessdaten zur Optimierung der Ausrichtung.....	108
7.5.1	Erzeugung und Referenzierung der Oberflächenmessdaten.....	108
7.5.2	Iterative Optimierung der Punktewolken-Ausrichtung	111
7.5.3	Optimierung der Marker-Ausrichtung und der Defektlokalisierung.....	113
7.5.4	Bestimmung und Vergleich der Messunsicherheiten.....	115
7.6	Zwischenfazit zur Validierung der Schadensanalyse.....	120
8	Kritische Reflexion und Ausblick	123
8.1	Kritische Reflexion des Forschungsprozesses.....	123
8.2	Kritische Reflexion des Forschungsdesigns.....	126
8.3	Ausblick auf künftige Fragestellungen.....	127
VI	Literaturverzeichnis	131
VII	Eigene Publikationen	139
VIII	Betreute studentische Arbeiten	141
IX	Anhang.....	143