

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-Strukturauteilen	1
2 Schadensreparatur im Faserverbundleichtbau	5
2.1 Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK)	5
2.2 Marktentwicklung für CFK	7
2.3 Schäden in CFK-Strukturauteilen	9
2.4 CFK-Reparatur im Automobilbau	11
2.5 Handlungsbedarf aus Sicht der CFK-Reparatur	14
3 Messtechnische Schadensanalyse von CFK-Strukturauteilen	15
3.1 Tomografische Messverfahren für CFK-Strukturauteile	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 Bauteilkordinaten system und Messvorrichtung	52
6.3.2 3D-Oberflächenmodell des geschädigten CFK-Strukturauteils	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