

I Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|-----------|
| I | Inhaltsverzeichnis | i |
| II | Formelzeichen | v |
| III | Abkürzungsverzeichnis | ix |
| IV | Abbildungsverzeichnis | xi |
| V | Tabellenverzeichnis | xvii |
| 1 | Die Schadenscharakterisierung als Enabler einer effizienten Reparatur von CFK-Strukturbauteilen | 1 |
| 2 | Messtechnische Charakterisierung von Schäden in CFK-Strukturbauteilen für die Fahrzeugreparatur | 5 |
| 2.1 | Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) | 5 |
| 2.1.1 | Aufbau von CFK-Strukturen | 5 |
| 2.1.2 | CFK-Strukturen im Automobilbereich | 8 |
| 2.1.3 | Schäden in CFK-Strukturen | 9 |
| 2.1.4 | Reparatur geschädigter CFK-Strukturen | 11 |
| 2.2 | Zerstörungsfreie Prüfung von CFK-Strukturen im Kontext der Fahrzeugreparatur | 13 |
| 2.2.1 | Anforderungen an die Schadensdetektion in CFK-Bauteilen im Kontext der Fahrzeugreparatur | 13 |
| 2.2.2 | Bewertung zerstörungsfreier Prüfverfahren für die Anwendung in der Fahrzeugreparatur von Strukturbauteilen | 15 |
| 2.3 | Messung von Bauteilschäden mittels Lock-in Thermografie | 18 |
| 2.3.1 | Hardwarekomponenten der Lock-in Thermografie | 19 |
| 2.3.2 | Generierung von Phasen- und Amplitudenbildern | 20 |
| 2.3.3 | Störeffekte bei der Lock-in Thermografiemessung | 22 |
| 2.3.4 | Tiefenbestimmung anhand von Phasenbildern | 23 |
| 2.3.5 | Laterale Schadensbestimmung | 25 |
| 2.4 | Abgeleiteter Handlungsbedarf aus dem Stand der Technik | 26 |
| 3 | Forschungsmethodik und Problemstellung | 29 |
| 4 | Messprozess zur CFK-Schadensbestimmung | 35 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1 | Definition der geometrischen Dimensionen von Impact- Schäden für die Lock-in Thermografiemessung | 35 |
| 4.2 | Messprozess zur Tiefenmessung von CFK-Schäden..... | 36 |
| 4.2.1 | Theoretische Grundlagen zur Wärmeausbreitung während der Lock-in Thermografiemessung von CFK-Strukturen..... | 38 |
| 4.2.2 | Numerische Berechnung des komplexen Wellenfeldes..... | 50 |
| 4.2.3 | Temperaturleitfähigkeitsbestimmung | 52 |
| 4.2.4 | Ermittlung der optimierten Anregungsfrequenz | 55 |
| 4.2.5 | Bestimmung des schadensspezifischen Reflexionskoeffizienten | 57 |
| 4.2.6 | Bestimmung der Schadenstiefe | 58 |
| 4.2.7 | Besonderheiten der Tiefenbestimmung realer Schäden | 59 |
| 4.3 | Messprozess zur Bestimmung der lateralen Dimensionen von CFK-Schäden | 62 |
| 4.3.1 | Bildaufnahme | 63 |
| 4.3.2 | Bildvorverarbeitung | 64 |
| 4.3.3 | Merkmalsextraktion..... | 70 |
| 4.3.4 | Bildanalyse | 70 |
| 4.4 | Zwischenfazit | 71 |
| 5 | Parameteroptimierung und Validierung des Messprozesses zur quantitativen CFK-Schadensbestimmung..... | 73 |
| 5.1 | Prüfstandsbeschreibung | 73 |
| 5.1.1 | Gestaltung von Referenzbauteilen | 73 |
| 5.1.2 | Thermografiesystem | 76 |
| 5.2 | Referenzmessungen | 77 |
| 5.3 | Parameteroptimierung | 78 |
| 5.3.1 | Optimierung der Einstellparameter des Thermografiesystems..... | 78 |
| 5.3.2 | Quantifizierung der Bildverarbeitungsparameter | 84 |
| 5.4 | Validierung des Messprozesses an Referenzgeometrien | 86 |
| 5.4.1 | Tiefenbestimmung bei optimierten Parametereinstellungen..... | 87 |
| 5.4.2 | Laterale Schadensbestimmung bei optimierten Parametereinstellungen | 92 |
| 5.5 | Zwischenfazit | 94 |
| 6 | Messunsicherheitsbestimmung anhand kalibrierter Referenzgeometrien | 97 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 6.1 | Identifizierung der Einflussgrößen | 97 |
| 6.2 | Strukturierung und Bewertung der Einflussgrößen..... | 98 |
| 6.3 | Definition des mathematischen Modells zur Messunsicherheitsbestimmung..... | 101 |
| 6.4 | Quantifizierung und Berechnung der kombinierten Unsicherheit | 102 |
| 6.4.1 | Auflösung des Messsystems | 103 |
| 6.4.2 | Bestimmung der Messunsicherheit des Messsystems | 104 |
| 6.4.3 | Bestimmung der Messunsicherheit des Messprozesses | 109 |
| 6.4.4 | Ergebnisanalyse der Messunsicherheitsbetrachtung | 111 |
| 6.5 | Prüfprozesseignung unter dem Aspekt der Fahrzeugreparatur..... | 113 |
| 6.6 | Zwischenfazit..... | 115 |
| 7 | Übertragung und Bewertung des entwickelten Messprozesses für reale CFK-Schäden..... | 117 |
| 7.1 | Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale CFK-Schäden | 117 |
| 7.1.1 | Tiefenbestimmung bei auftretenden Kontaktwiderständen..... | 117 |
| 7.1.2 | Tiefenbestimmung an impactgeschädigten Platten | 120 |
| 7.1.3 | Bestimmung der lateralen Prüfmerkmale von Impact-Schäden..... | 121 |
| 7.2 | Bewertung der Anwendbarkeit des entwickelten Messprozesses auf die CFK-Schadensdetektion im Reparaturprozess | 125 |
| 7.2.1 | Kritische Reflexion | 125 |
| 7.2.2 | Potenziale zur Weiterentwicklung..... | 128 |
| 8 | Zusammenfassung..... | 131 |
| VI | Anhang | 133 |
| VII | Literaturverzeichnis | 141 |
| VIII | Eigene Publikationen | 151 |
| IX | Betreute studentische Arbeiten | 153 |