

# Teil 1:

## Multisensorbasierte Schadenserkennung und Qualitätssicherung im CFK-Reparaturprozess

AiF-Nr.: 18757N

### Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis .....	14
Abbildungsverzeichnis.....	15
Tabellenverzeichnis.....	16
Zusammenfassung .....	17
1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung .....	19
2 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit dem Ziel des Forschungsvorhabens .....	20
2.1 Ziel des Forschungsvorhabens .....	20
2.2 Angestrebte und erreichte Forschungsergebnisse.....	20
3 Erläuterung der Forschungsergebnisse .....	22
3.1 Anforderungsanalyse .....	22
3.2 Messmittel und Schadenserfassung.....	25
3.3 Entwicklung eines 3D-Gesamtdatenmodells mittels Multisensorfusion .....	35
3.4 Qualitätssicherung des Reparaturergebnisses (TP4).....	41
3.5 Nachweis der Prüfprozesseignung.....	41
4 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für kleine und mittlere Unternehmen .....	47
4.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen.....	47
4.2 Wirtschaftlicher Nutzen .....	47
5 Literaturverzeichnis .....	49
6 Anhang.....	50
6.1 Fehlerfläche: Messreihe A und Messreihe B .....	50
6.2 Fehlerfläche: Statistische Auswertung der Messreihe B .....	52
6.3 Fehlerlage: Statistische Auswertung der Messreihe B .....	43
6.4 Kalibrierung der Ultraschallmessung.....	54
6.5 Messreihen der Ultraschall-Messsystemanalyse .....	55
6.6 Messreihen der Ultraschall-Messprozessanalyse .....	56

**Teil 2:****Methodenentwicklung zur struktur-mechanischen Schadensabbildung und -bewertung faserverstärkter Kunststoffe und zur Auslegung von Reparaturkonzepten**

AiF-Nr.: 18758N

**Inhaltsverzeichnis**

Zusammenfassung .....	60
Abbildungsverzeichnis .....	61
Tabellenverzeichnis .....	64
1 Einleitung.....	65
1.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung .....	65
1.2 Forschungsziel .....	66
1.3 Angestrebte und erreichte Forschungsergebnisse .....	66
2 Ergebnisse.....	67
2.1 Anforderungsanalyse.....	67
2.2 Erstellung von Datensätzen zum mechanischen Verhalten beschädigter und unbeschädigter FVK .....	70
2.2.1 Quasistatische Versuche an unbeschädigten Laminaten .....	72
2.2.2 Quasistatische Versuche an unbeschädigten Laminaten .....	73
2.2.3 Dynamische Versuche an unbeschädigten und beschädigten Hutprofilen .....	74
2.3 Entwicklung von Methoden zur Simulation und beschädigter FVK.....	80
2.3.1 Bestimmung der Materialkarte für unbeschädigte FVK .....	82
2.3.2 Mapping eines Schadens auf das FE-Netz eines Bauteils .....	86
2.3.3 Bestimmung der Materialkarte für beschädigte FVK .....	89
2.4 Leitfaden zur strukturmechanischen Bewertung von Schäden an FVK .....	95
2.5 Leitfaden zur Auslegung von FVK-Reparaturmethoden .....	96
2.6 Validierung am Demonstratorbauteil .....	99
2.6.1 Vorschädigung der Demonstratorbauteile .....	100
2.6.2 Schadenserfassung an den vorgeschädigten Demonstratorbauteilen (TP 1).....	100
2.6.3 Anpassung des Validierungsansatzes.....	101
2.6.4 Reparatur der Hutprofile .....	101
2.6.5 Dynamische Drei-Punkt-Biegeversuche an reparierten Hutprofilen.....	102
3 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für KMU .....	104

4	Ergebnisse und Ausblick .....	105
5	Literatur .....	107
6	Anhang.....	108
6.1	Abminderungsfaktoren Zug-Beanspruchung .....	108
6.2	Abminderungsfaktoren Biege-Beanspruchung .....	111
6.3	Leitfaden I .....	113
6.4	Leitfaden II .....	119

**Teil 3:****Entwicklung von Methoden zur wirtschaftlichen  
Reparatur von geschädigten FVK-Strukturauteilen  
unter Berücksichtigung der Reparaturwerkstatt-  
bedingungen mittels flexibler und neuartiger  
Fertigungs- und Fügeverfahren**

AiF-Nr.: 26LN

**Inhaltsverzeichnis**

Abbildungsverzeichnis .....	128
Tabellenverzeichnis .....	131
Zusammenfassung .....	132
1 Einleitung .....	135
1.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung .....	135
1.2 Forschungsziel .....	136
1.3 Angestrebte und erreichte Forschungsergebnisse .....	136
2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum .....	137
2.1 Teilprojekt- und arbeitspaketübergreifende Arbeiten .....	137
2.2 Entwicklungen von Methoden zur wirtschaftlichen Reparatur (IGF-Vorhaben 26 LN) .....	140
2.2.1 Anforderungsanalyse .....	140
2.2.2 Bewertung bestehender Reparaturverfahren und neuer Ansätze auf Basis der Anforderungsanalyse .....	141
2.2.3 Entwicklung von Methoden zur wirtschaftlichen Herstellung von individuellen bauteilangepassten Reparaturpatches mittels flexiblen Fertigungstechniken für faserverstärkte Kunststoffe, metallische und hybride Bauteilstrukturen .....	142
2.2.4 Entwicklung flexibler und werkstatttauglicher Fügetechniken .....	168
2.2.5 Ausarbeitung der Reparaturmethoden in Form eines Expert-Tools .....	185
2.2.6 Validierung der Fertigungs- und Fügetechniken anhand eines Demonstrators zur Reparatur des geschädigten FVK-Bauteils unter Reparaturwerkstattbedin- gungen .....	189
3 Ergebnisse und Ausblick .....	194
4 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungser- gebnisse für kmU .....	196
5 Literaturverzeichnis .....	198
6 Anhang .....	198
6.1 Steckbriefe für die flexible Werkzeugtechnik .....	199
6.2 Leitfaden zur Patchherstellung und Reparatur von CFK-Strukturauteilen .....	223