

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Stand der Technik und Forschung.....	3
2.1	Laserbasiertes Direktfügen von Kunststoffmischverbindungen .....	3
2.1.1	Grundlagen der Laser-Material-Wechselwirkung .....	4
2.1.2	Prozessprinzip und Verfahrensvarianten des laserbasierten Fügens im Durchstrahlverfahren.....	8
2.1.3	Prozessinduzierte Defekte der laserbasierten Erwärmung .....	10
2.1.4	Haftungsmechanismen.....	13
2.1.5	Einordnung des laserbasierten Direktfügens von TP und EP-CFK und Darstellung des aktuellen Forschungsstands.....	14
2.2	Einsatz von Verbindungselementen zur Montage von Anbauteilen.....	17
2.2.1	Verbindungsstrategien und Elementausprägungen zur Bereitstellung von Befestigungspunkten an CFK-Strukturen .....	18
2.2.2	Verfahren zur Befestigung von „Onserts“ an EP-CFK .....	20
3	Struktur der Arbeit.....	23
3.1	Forschungsthemen und -fragestellungen .....	23
3.2	Methodisches Vorgehen .....	25
4	Experimentelle Randbedingungen und Versuchsmethoden.....	29
4.1	Verwendete Materialien .....	29
4.1.1	Laserabsorbierende Fügeteile .....	29
4.1.2	Lasertransparente Fügeteile und Verbindungselemente.....	31
4.1.3	Klebstoffsysteme und Klebbolzen.....	32
4.2	Lasersystem und Prozessparameter.....	34
4.2.1	Verwendete Laserquelle und Versuchsaufbauten.....	34
4.2.2	Verfahrensvarianten und -parameter .....	35
4.3	Versuchsmethoden und Analyseverfahren.....	38
4.3.1	Infrarotbasierte Temperaturmessungen .....	38
4.3.2	Optische Analyse der Verbindungsausprägung und des Bruchverhaltens .....	39

4.3.3	Bestimmung der Schwellwertenergien zur Generierung von Matrixabtrag.....	40
4.3.4	Mechanische Prüfverfahren .....	40
4.3.5	Analytische Prüfverfahren .....	43
4.3.6	Alterung & Konditionierung .....	45
5	Analyse des laserbasierten Direktfügeprozesses .....	47
5.1	Untersuchung der laserbasierten Erwärmung von EP-CFK.....	48
5.1.1	Morphologische Charakterisierung der verwendeten EP-CFK-Materialien ....	49
5.1.2	Thermografische Analyse des Erwärmungsverhaltens von EP-CFK.....	50
5.1.3	Eignung des Erwärmungsverhaltens von EP-CFK für den Fügeprozess .....	56
5.2	Untersuchung verfahrenscharakteristischer Verbindungsausprägungen .....	58
5.2.1	Analyse des Abtragsverhaltens der Matrixdeckschicht.....	59
5.2.2	Ermittlung der Grenzschichtausprägungen im Fügeverbund .....	64
5.3	Untersuchung des Schädigungspotenzials der NIR-Laserstrahlung .....	68
5.3.1	Analyse potenzieller oberflächennaher Schädigungen mittels DCB-Prüfung .	69
5.3.2	Analyse potenzieller Schädigungen mittels 3-Punkt-Biegeversuch.....	72
5.3.3	Analyse thermischer Schädigungen mittels FTIR-Spektroskopie.....	74
5.3.4	Thermische Grenzen für die schädigungsfreie laserbasierte Erwärmung .....	77
5.4	Untersuchung prozess- und materialtechnischer Einflüsse auf die Verbindungseigenschaften.....	79
5.4.1	Untersuchung der Adhäsion an den eingesetzten EP-CFK-Oberflächen unter Einfluss der verwendeten thermoplastischen Materialien .....	79
5.4.2	Auswirkung vorliegender Trennmittelkontaminationen .....	84
5.4.3	Einfluss der Laserintensität auf die Verbindungseigenschaften.....	88
5.4.4	Untersuchung des Energieeinflusses zur Ermittlung von Prozessfenstern .....	92
5.4.5	Einfluss des Anpressdrucks und der Oberflächenrauheit .....	95
5.4.6	Untersuchung der quasi-simultanen Prozessführung .....	97
5.5	Diskussion prozessspezifischer Wirkzusammenhänge und Einflussfaktoren zur Beantwortung der Forschungsfragen 1-5 .....	102
6	Anwendungspotenzial zur Anbringung von Verbindungselementen.....	112
6.1	Bewertungskriterien .....	112

---

6.2	Anwendbarkeit der Technologie zum Fügen von Verbindungselementen .....	113
6.2.1	Gegenüberstellung des Kontur- und Quasi-Simultan-Verfahrens zum Fügen von Verbindungselementen.....	113
6.2.2	Einfluss der Elementsockelgeometrie .....	115
6.3	Technologievergleich unter einsatzrelevanten Bedingungen.....	119
6.3.1	Initiale Verbindungsperformance unter Kopfzug- & Zugscherbelastung .....	120
6.3.2	Verbindungsperformance unter Temperatureinfluss .....	122
6.3.3	Untersuchung der Alterungsrobustheit .....	124
6.3.4	Auswirkung von Feuchtigkeit auf den laserbasierten Direktfügeprozess .....	125
6.4	Diskussion des Anwendungspotenzials der Technologie zur Beantwortung der Forschungsfragen 6 & 7 .....	128
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	135
8	Literaturverzeichnis .....	139