

# 1 Werkstattgerechte Schadensanalyse von CFK-Strukturbauarten

*Shopfloor suitable damage analysis of CFRP parts*

Das Ziel ist eine drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen: Deutschlands Beitrag zum Pariser Klimaabkommen ist es, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis zum Jahr 2030 bezogen auf das Jahr 1990 um 65% zu verringern. Dies ist ein Beitrag zur weltweiten Verringerung der Treibhausgasemissionen mit dem Ziel, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad, möglichst 1,5 Grad, bis zum Ende des Jahrhunderts zu begrenzen. Ein entscheidender Stellhebel in diesem Kontext ist der Verkehrssektor, welcher mit einem Anteil von 19% am bundesweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoß beteiligt ist und dessen Treibhausgasbilanz sich seit 1990 kaum verändert hat. Die in Deutschland neu zugelassenen Kraftfahrzeuge haben im Durchschnitt einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 125 Gramm pro Kilometer; der EU-weit zweithöchste Wert, der bis Ende 2021 auf 95 Gramm zu reduzieren ist. Da zudem 95% der neu zugelassenen Kraftfahrzeuge noch immer mit Benzin oder Diesel fahren, kommt der Verringerung des Kraftstoffverbrauchs eine entscheidende Rolle zu. Ein 100 Kilogramm leichteres Chassis reduziert den Kraftstoffverbrauch um ca. 0,5 Liter pro 100 Kilometer, welches mit einer Verringerung der Treibhausgasemissionen einher geht. Charakteristisch für den Leichtbau, wie z.B. mittels carbonfaserverstärkter Kunststoffe (CFK), ist jedoch nicht nur weniger Masse, sondern zusätzlich eine durchdachte Funktionsintegration sowie eine last- und werkstoffoptimierte Konstruktion. Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen ermöglicht der CFK-Leichtbau eine Kompensation des Batteriegewichts und somit eine Erhöhung der Reichweite bzw. im Umkehrschluss eine Einsparung der Energie je gefahrenem Kilometer; Energie, die immer noch zu großen Teilen mittels fossiler Energieträger erzeugt wird. [BMW121], [BUND21], [UMWE22]

CFK gehören zu der Klasse der Verbundwerkstoffe, stellen jedoch eigentlich Konstruktionen aus hochfesten Fasern dar, die als Verstärkungskomponente in eine Polymermatrix eingebunden werden. Sowohl die Bedarfsmenge als auch der Umsatz von CFK sind zwischen 2013 und 2018 um jährlich knapp 12% gestiegen [CARB19]. Der größte Wachstumstreiber neben der Luft- und Raumfahrtindustrie stellt weiterhin die Automobilindustrie dar, auch wenn sich die Art des CFK-Einsatzes gewandelt hat. Der großflächige Einsatz von CFK als „Metallersatz“ in Serienfahrzeugen, wie z.B. bei der Einführung des BMW i3 im Jahr 2013, stellt auch im Jahr 2020 noch einen Einzelfall dar. In den letzten Jahren wurden vielmehr Multi-Material-Konzepte entwickelt. CFK kommt gezielt dort zum Einsatz, wo es im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen besondere Vorteile hinsichtlich Gewichtserspartis, Festigkeit und Steifigkeit bietet. Eine große Herausforderung ist jedoch die Sicherstellung dieser Festigkeit im Schadensfall. CFK zeigen Schädigungsbilder, die bei konventionellen metallischen Werkstoffen unbekannt sind. Können metallische Werkstoffe mechanischen Belastungen mit plastischer Verformung entgegentreten, so sind CFK sehr spröde; eine Einschlagenergie jenseits der elastischen Belastungsgrenze führt unmittelbar zu Schädigungen [AGRA14]. Dies sind Schäden an der Faser, der Polymermatrix oder dem Verbund wie dem interlaminaren Riss einer Delamination [EHRL04, S. 3]. Ein typischer Schaden, bei dem in der Regel alle der genannten Schadensarten in Erscheinung treten ist der sogenannte Impactschaden, welcher u. a. durch

unkonventionelle Belastungen im Gebrauch wie Schlag- und Stoßbelastungen entsteht [MOSE92, S. 127]. Gefährlich sind insbesondere die Impactschäden, die gar nicht oder nur schwer mit bloßem Auge zu erkennen sind; aus diesem Grund häufig als „barely visible impact damage“, kurz BVID, bezeichnet [USDE10]. Insbesondere Schläge mit niedriger Einschlaggeschwindigkeit rufen Schädigungen im Bauteil hervor, deren Ausmaß von außen kaum ersichtlich ist. Der langsam laufende Schädigungsvorgang führt zu einem an der Aufprallstelle kaum sichtbaren Schaden, da die gesamte CFK-Struktur an der Absorption der Schadensenergie beteiligt ist; wodurch diese jedoch auch in weiten Bereichen um die Aufprallstelle herum auf Schädigungen geprüft werden muss. [SAFR14], [WÖST05, S. 4]

Dem Vorteil der hohen gewichtsbezogenen Festigkeit treten Nachteile bei der Schadenserkennung und der Reparatur entgegen. Da in CFK die Last zu großen Teilen durch die Fasern, d.h. speziell für den Lastfall orientierte und ausgelegte Faserkonstrukte, getragen wird, sind konventionelle Reparaturverfahren wie das Vernieten oder Verschweißen von Ersatzteilen nicht zielführend. Aufgrund fehlender abgesicherter Reparaturverfahren kommt es auch bei oberflächlich kleinen Fehlern häufig zu einem Austausch ganzer Bauteile. Beispielhaft ist hier das BMWi3-Reparaturkonzept zu nennen, welches schon bei Rissen ab einer Länge von 10 mm den vollständigen Austausch des Bauteils vorschreibt [KRAF14]. Abgeleitet aus dem Defizit fehlender kosteneffizienter und ressourcenschonender Reparaturverfahren motivierte sich die Forschungsarbeit der „interaktiven Reparaturwerkstatt der Zukunft für Elektromobile in CFK-Bauweise“ - kurz: CFK-Werkstatt - der RWTH Aachen. Ein zentrales Element der Forschungsarbeit und die notwendige Voraussetzung zur Entwicklung von Reparaturverfahren stellte das Teilprojekt zur „multisensorbasierten Schadenserkennung und Qualitätssicherung im CFK-Reparaturprozess“ (IGF-Vorhaben 18575N) dar. Die in diesem Teilprojekt erarbeiteten Erkenntnisse und Vorversuche schafften die Grundlage für die im Folgenden dargelegte Forschungsarbeit. Die Erkennung von Gebrauchsschäden in CFK-Strukturauteilen erfolgt in den meisten Fällen auch heute noch durch eine einfache Sichtprüfung oder eine Prüfung mit optischen kamera- oder laserbasierten Verfahren. Zur zielgerichteten Detektion und Quantifizierung von Impactschäden ist jedoch der Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren (Zfp) unabdingbar, welche mit dem zu prüfenden Werkstoff in eine Wechselwirkung treten und dadurch nützliche Informationen über den inneren Zustand eines Bauteils liefern. Voraussetzung für die werkstattgerechte CFK-Reparatur ist die Schadensbewertung für die Schäden nicht nur detektiert, sondern zugleich quantifiziert und im Bauteil lokalisiert werden müssen.

Die Ultraschallmesstechnik ist eines der ältesten und am meisten verbreiteten Verfahren zur zerstörungsfreien Schadenserkennung; bietet sie doch einen Kompromiss zwischen der hochauflösenden, aber zeitaufwendigen und werkstattungeigneten Röntgen-Computertomografie und einer werkstattgeeigneten, aber mit einer niedrigen Tiefenauflösung behafteten Lock-In-Thermografie. Sie wurde in den letzten 10 Jahren insbesondere mit dem Aufkommen der Phased-Array-Sensorik und damit einhergehenden neuartigen Schallanregungsverfahren kontinuierlich weiterentwickelt. Es fehlen jedoch spezifische Auswertemethoden, Messunsicherheitsbetrachtungen sowie Werkstattkonzepte zur Beantwortung der zuvor aufgeführten zentralen Fragestellungen der Schadensanalyse und -bewertung von CFK-Strukturauteilen.

Auf Basis der in den folgenden beiden Kapiteln dargelegten Konsolidierung des Stands der Technik lassen sich folgende zentrale Defizite formulieren:

- *Fehlendes Hardware- und Software-Konzept zur Implementierung eines Ultraschallmesssystems in CFK-Werkstätten*
- *Fehlende Verfahren und Algorithmen zur dreidimensionalen ultraschallbasierten Erfassung und Quantifizierung von Schäden in CFK*
- *Fehlende Modellierung der resultierenden Messunsicherheitsbeiträge*
- *Fehlende Optimierungsmethoden zur Reduktion der Messunsicherheitsbeiträge*

Abgeleitet von diesen erkannten Defiziten motiviert sich folgende Hauptforschungsfrage:

**„Ist ein optisch geortetes Ultraschallmesssystem dazu geeignet, Schäden in CFK-Strukturbauteilen werkstattgerecht und mit einer für die CFK-Reparatur hinreichenden Unsicherheit zu lokalisieren und zu quantifizieren?“**

In Kapitel 2 wird zunächst der Stand der Technik dargelegt. Es werden kurz die Eigenschaften und die Marktentwicklung von CFK diskutiert. Im Anschluss liegt der Fokus auf den Schadensbildern in CFK sowie vorhandenen und in Entwicklung befindlichen Reparaturverfahren. Kapitel 3 befasst sich mit der messtechnischen Schadenserkennung, begründet den Einsatz der Ultraschallmesstechnik und zeigt Defizite hinsichtlich der ultraschallbasierten Schadensanalyse, der Werkstatttauglichkeit sowie der Messunsicherheitsbestimmung auf. Der Hauptteil dieser Forschungsarbeit beginnt in Kapitel 4 mit der Darlegung der angewandten Forschungsmethodik des Design Science Research (DSR) und einer Formulierung der forschungsleitenden Teilforschungsfragen. Im Anschluss wird der Aufbau der Kapitel 5-8 aus dem Kontext der DSR-Methodik heraus motiviert und dargelegt. Die Inhalte dieses Hauptteils der Forschungsarbeit und der abgrenzende heuristische Bezugsrahmen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

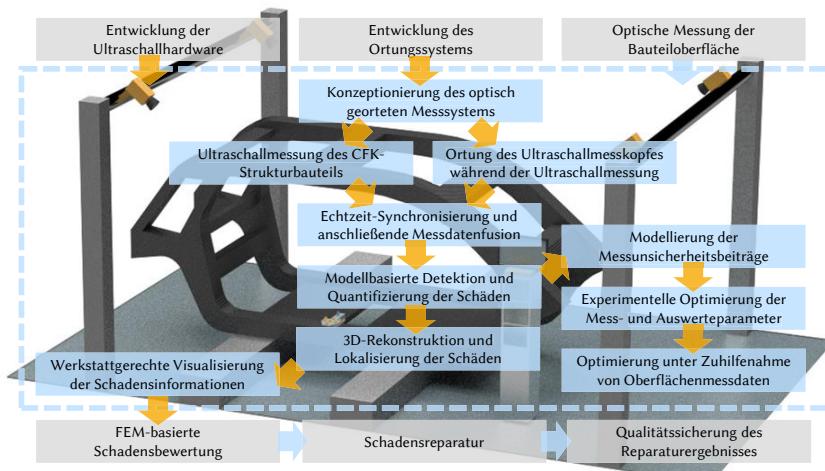


Abbildung 1-1: Heuristischer Bezugsrahmen und Inhalte der Forschungsarbeit

Da die Entwicklung der Ultraschallhardware und des Ortungssystems nicht Teil des Forschungsgegenstands ist, beginnt *Kapitel 5* mit der Kombination dieser existierenden Messsysteme und zugleich der Konzeptionierung des optisch georteten Messsystems. Dies beinhaltet die Auswahl und Konfiguration der Hardwarekomponenten, die Entwicklung einer Steuerelektronik zur synchronen Messdatenaufnahme sowie die Konzeptionierung der Messsoftware zur Messdatenauswertung und -visualisierung. Auf Basis des neu konzeptionierten optisch georteten Ultraschallmesssystems werden in *Kapitel 6* eine Methodik sowie Algorithmen zur Erkennung, Lokalisierung und Quantifizierung von Schäden in CFK konzeptioniert. Die Methodik beinhaltet die 3D-Rekonstruktion der Ultraschallmessdaten, die modellbasierte Analyse der laufzeitabhängigen Schallintensitäten sowie das Clustering der Ultraschall-Punktwolken. Parallel dazu wird die Unsicherheit des Messsystems modelliert und diese als Zielgröße zur Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen verwendet. Zur Unsicherheitsbestimmung werden komponentenspezifische Prüfstände und Versuchsdesigns entwickelt, welche in *Kapitel 7* erläutert werden. Zur Beurteilung des optischen Ortungssystems wird ein Versuchsplan basierend auf Referenz-Streckenmessungen eines Koordinatenmessgeräts entwickelt. Die parameterabhängigen Messunsicherheitsbeiträge des Phased-Array-Prüfsystems werden hingegen mit einem Linearachs-Prüfstand mit Messkopfführung in Tauchtechnik bestimmt. Nach Betrachtung der Messsystemkomponenten im Einzelnen wird das Gesamt-Messsystem im Verbund betrachtet und die Einstellparameter des Ultraschallmessalgoritmus iterativ optimiert. Abschließend wird die Möglichkeit der Messunsicherheitsreduktion unter Zuhilfenahme von Oberflächenmessdaten eines separaten im Reparaturprozess verwendeten optischen Messsystems aufgezeigt und experimentell validiert.

Bezogen auf den konzeptionierten Messprozess endet diese Forschungsarbeit mit der Bereitstellung der notwendigen Schadensinformationen für die FEM-basierte Schadensbewertung. Die Schadensbewertung, die auf Basis dieser auszulegenden Schadensreparatur sowie die Qualitätssicherung des Reparaturergebnisses sind nicht mehr Gegenstand dieser Forschungsarbeit (vgl. Abbildung 1-1).

Die schriftliche Ausarbeitung dieser Forschungsarbeit endet nach Beantwortung der forschungsleitenden Teilstudienfragen in den *Kapiteln 5-7* mit einer kritischen Reflexion und einer Beantwortung der Hauptforschungsfrage in *Kapitel 8* und einen damit verbundenen Ausblick auf künftige Forschungsarbeiten.