

# Reparieren statt austauschen

## Verfahren zur Reparatur von CFK-Bauteilen ohne Spanen

CFK-Bauteile sind häufig unter rauen Umweltbedingungen im Dauereinsatz, etwa in Flugzeugen und Kraftfahrzeugen. Bei auftretenden Schäden werden die CFK-Strukturen in vielen Fällen einfach durch neue Bauteile ersetzt. Das liegt vor allem am hohen Aufwand der etablierten Reparaturmethoden. Mit einem neuen Verfahren können defekte CFK-Strukturen nun deutlich einfacher lokal repariert werden.

Der Einsatz von Faserverbundkunststoffen (FVK) auf der Basis von Endlosfaserverstärkungen wächst stetig [1]. Das liegt vor allem am Wunsch nach reduzierten Schadstoff- und Treibhausgasemissionen und einer gesteigerten Energieeffizienz bei gleichzeitig sehr guter mechanischer Leistungsfähigkeit und erhöhter Wirtschaftlichkeit, der zu einem verstärkten Einsatz von Leichtbaulösungen geführt hat. Mit dem gegenwärtig stark steigenden Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK), u.a. in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, erhöht sich auch die Nachfrage nach leistungsfähigen und bedarfsgerechten Reparaturkonzepten für FVK-Komponenten [2]. Reparaturbedürftige Schäden an CFK-Strukturen haben vielfältige Ursachen. Häufigste Schadensarten in der Nutzungszeit sind Materialermüdung, überhöhte Betriebslasten, Impact- bzw. Crashbeanspruchungen, Schädigungen bei der Wartung, Kontaktkorrosion und Sonderlastfälle.

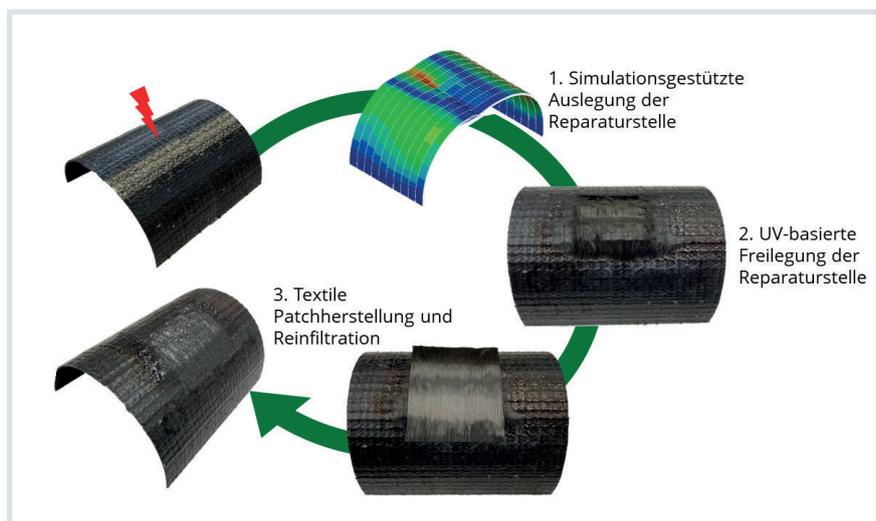
Die Reparatur derartiger Schäden ohne Überdimensionierung bzw. Änderung der Wanddicken kann z.B. durch einen vollständigen Ersatz der geschädigten CFK-Bauteile erfolgen. Dieser ist allerdings wenig nachhaltig und durch die erforderlichen Neubauteile mit hohen Kosten verbunden [3]. Deshalb wurden verschiedene Reparaturmethoden für spezielle Bauteilgruppen und Einzelfälle entwickelt, die allerdings oft mit einem erheblichen manuellen Aufwand und somit ungenügender Reproduzierbarkeit verbunden sind. Diese Verfahren basieren überwiegend auf einem spanenden Abtragen des geschädigten Bereichs und dem anschließenden Einkleben bzw. Nieten eines neuen CFK-Patches [4–7].

Ein anderes Prinzip liegt einem am Institut für Textilmaschinen und Textile

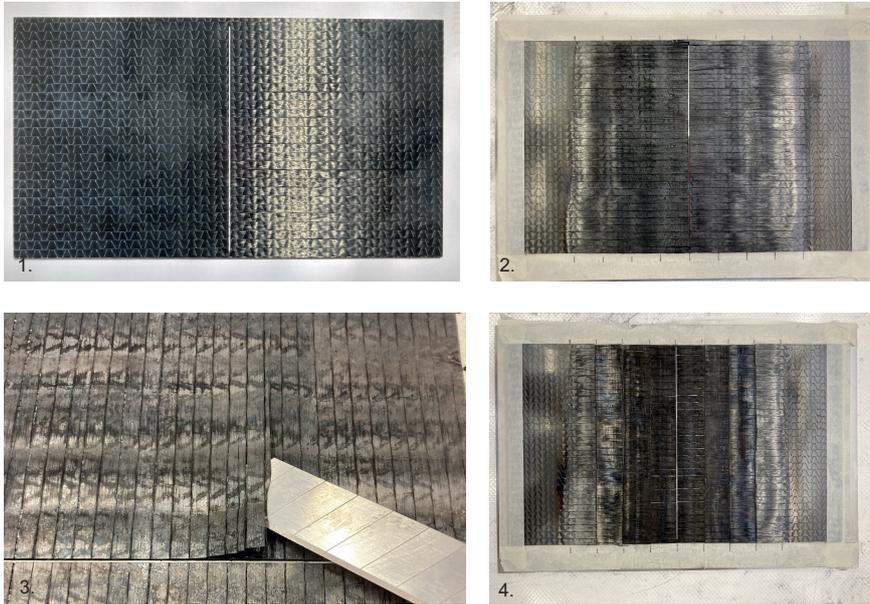
Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden entwickelten Verfahren zur Reparatur von CFK-Bauteilen zugrunde. Bei diesem wird durch den Einsatz von anorganischen Halbleiteroxiden (HLO) und einer gezielten Bestrahlung mit ultraviolettem (UV) Licht der Matrixwerkstoff im geschädigten Bereich oxidativ abgebaut und die Carbonfaserstruktur vollständig freigelegt. Ziel des abgeschlossenen Forschungsprojekts war die Entwicklung einer flexibel einsetzbaren Reparaturmethode für defekte, mehrachsig belastete, dünnwandige FVK-Bauteile. Sie basiert auf drei Prozessschritten (Bild 1). Zunächst wird ein lastangepasster textiler Patch simulationsgestützt auslegt. Anschließend erfolgt durch eine gezielte UV-Bestrahlung die lokale Matrixentfernung im Bereich der Schadstelle. Auf diese wird dann der hergestellte textile Reparatur-Patch zur Wiederauffüllung der Reparaturstelle appliziert und abschließend mit einem Harzsystem reinfiltriert.

Für die lastgerechte strukturkompatible Reparatur wurde ein Simulationsmodell erstellt, mit dem die textilen Reparatur-Patches ausgelegt werden können. Dazu wurde der Verbundaufbau aus Gelegen modelliert. Zur Nachbildung der Verstärkungsfasern kam ein Mesomodell mit Schalenelementen zum Einsatz, wobei die Materialmodellierung auf Basis eines dreischichtigen Laminatansatzes erfolgte. Für gekrümmte Bauteile wurde dazu ein Drapiermodell erstellt. Der Verbund wurde durch die Anwendung der Domain Superposition Technique (DST) aus der Kopplung des Textilmodells mit einem Matrixmodell generiert.

Die Simulation der Reparatur erfolgte mittels einer geschädigten Probe. Es wurde eine Parameterstudie mit variierenden Überlappungslängen des Reparaturpatches durchgeführt und danach die notwendige Überlappung zur Realisierung eines bestmöglichen Kraftflusses über interlaminaeren Schub zwischen den »



**Bild 1.** Übersicht über das simulationsgestützte Reparaturverfahren für CFK-Bauteile: Die Methode ermöglicht eine gezielte Reparatur der Schadstelle Quelle: ITM; Grafik: © Hanser



**Bild 2.** Bei dem Verfahren wird die geschädigte Stelle (1) mit einem UV-LED-Strahler behandelt (zu sehen in Bild 3). Bei dem dadurch freigelegten Reparaturbereich (2) werden anschließend die Fasern getrennt (3). Die vorbereitete Reparaturstelle (4) wird danach gereinigt, aktiviert und durch einen Haftvermittler für die Einbringung des Patches präpariert. Quelle: ITM; Grafik: © Hanser

Einzelschichten in Experiment und Simulation analysiert. Die Simulationen zeigten, dass mit zunehmender Länge der Überlappung des Reparaturpatches die Zugfestigkeit des reparierten Verbunds steigt. Das Modell wurde durch den Abgleich mit ex-

perimentellen Untersuchungen validiert. Diese zeigten, dass bei optimalem Kraftschluss des Patches zum Bestandsbauteil eine nahezu vollständige Wiederherstellung der strukturellen Eigenschaften erreicht werden kann.

### UV-Licht statt manuellem Abtragen

Danach erfolgte basierend auf den Simulationsergebnissen der lokale Matrixabtrag im Reparaturbereich durch die Aktivierung von Halbleiteroxiden mit einem UV-LED-Strahler. Durch dieses Verfahren wird eine radikalische Polymerdekomposition initiiert. Für diesen Prozessabschnitt erfolgte die Festlegung der Prozessparameter durch eine Evaluierung der Oberflächeneigenschaften und mittels optischer, mechanischer und thermischer Analytik. Nachfolgend wurde eine Reinigung bzw. Aktivierung und gleichzeitige Wiederbeschichtung der freigelegten Carbonfasern mithilfe einer Plasmafackel realisiert. Dabei wurden durch eine gezielte Behandlung und Einbringung eines Haftvermittlers die Differenzen in der Faseroberfläche egalisiert und diese für die nachstehenden Reparaturprozessschritte präpariert (Bild 2).

Für das Projekt kam ein UV-LED-Strahler vom Typ Semray 4103 von Heraeus mit einer Emitterfläche von 45 mm x 154 mm und 395 nm Wellenlänge zum Einsatz (Bild 3). Damit konnten die Filamente im Schadbe-

reich fast vollständig freigelegt werden [8]. Um bei komplexen dickwandigen 3D-FVK-Bauteilen einen vollständigen, lokal begrenzten Matrixabbau erfolgreich durchführen zu können, müssen allerdings u.a. die Bestrahlungsparameter Leistung und Bestrahlungsfläche sowie der Bauraum des Strahlers angepasst werden. Außerdem besteht noch Forschungsbedarf bei der nachfolgenden Reinigung und Wiederbeschichtung mit der Plasmafackel. Durch eine unzureichende Haftung zwischen den freigelegten Filamenten im Bauteil und dem textilen 2D-Reparaturpatch kommt es zu verminderten Verbundeigenschaften. Ein möglicher Lösungsansatz ist eine zweistufige Behandlung mit der Plasmafackel: Im ersten Schritt erfolgt eine Abtragung von abgebauten Matrixrückständen auf den Filamenten mit Druckluft und im zweiten Schritt die Wiederbeschichtung mit einem Haftvermittler. Für die Untersuchungen wurde dafür der Vermittler EP 871 von Michelman verwendet.

### Tests mit UD-, TFP- und MLG-Patches

Die dünnwandigen FVK-Bauteile (vier Lagen biaxial verstärktes Gelege [(0/90)<sub>2</sub>]<sub>s</sub>, Dicke = 1,5 mm) mit zuvor freigelegtem und erneut mit Schlichte (Haftvermittler) versehenem Reparaturbereich konnten im dritten Schritt mithilfe eines textilen 2D-Patches und einer Reinfiltration mit einem Harzsystem repariert werden. Als



**Bild 3.** Der Matrixabtrag im Reparaturbereich erfolgt mithilfe eines UV-LED-Strahlers. Im Vergleich zu üblichen Verfahren entfällt der manuelle Aufwand, was für eine höhere Reproduzierbarkeit sorgt. © ITM

## Die Autoren

**Dipl.-Ing. David Rabe** ist seit 2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden; david.hoffmann@tu-dresden.de

**Philippa Böhnke** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Forschungsgruppe Textilchemie/Textilausrüstung sowie Polymer- und Fasertechnologie des ITM.

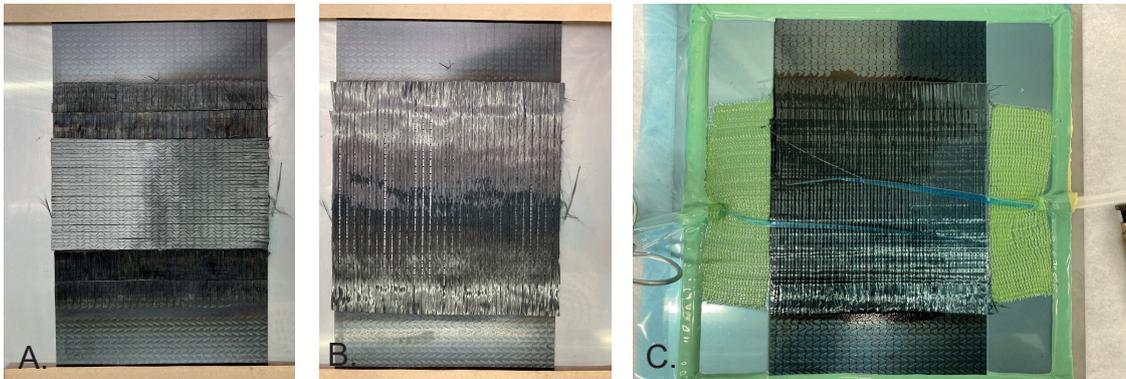
**Thi Anh My Huynh** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Forschungsgruppe Struktur- und Prozesssimulation des ITM.

**Dr. Iris Kruppke** leitet die Forschungsgruppen Textilchemie/Textilausrüstung sowie Polymer- und Fasertechnologie des ITM.

**Dr. Thomas Gereke** ist Forschungsgruppenleiter Struktur- und Prozesssimulation am ITM.

**Eric Häntzsche** leitet die Forschungsgruppen Textilien für den Leichtbau am ITM.

**Prof. Chokri Cherif** ist Institutsdirektor des ITM und Inhaber der Professur für Textiltechnik.



**Bild 4.** Für die Reparatur wird ein Patch in die präparierte Stelle eingelegt: (A) Erster Patchteil eingelegt, (B) zweiter Patchteil eingelegt. Dann folgt die Reinfiltration (C) Quelle: ITM; Grafik: © Hanser

Reparaturpatches kamen im Projekt Zugschnitte aus unidirektionalen Schichten (UD), Tailored Fibre Placement (TFP) und Mehrlagengestrick (MLG) zum Einsatz. Alle basierten auf der Carbonfaser des Ausgangsmaterials Toray T700SC 50 C 800 tex. Sie wurden entsprechend der Simulationsergebnisse lastangepasst ausgelegt, maschinell hergestellt, anschließend textilphysikalisch charakterisiert (Flächenmasse, Fadendichten, Dicke) und mit der Referenz (entfernte Fasermasse) verglichen. Die Reparaturstelle wurde nach der Patchapplikation mit der auf dem Vacuum-Assisted-Resin-Infusion-Verfahren (VARI) basierenden Reinfiltrationsmethode mit einem Reparaturmatrixsystem wiederaufgefüllt und konsolidiert (**Bild 4**). Als Harzsystem kamen verschiedene Varianten (RIMR 135; ER0051; ER5500) zum Einsatz. Nach verbundmechanischer Charakterisierung wurde das ursprüngliche Harzsystem, aus welchem die Proben hergestellt wurden, aufgrund der höchsten ermittelten Festigkeit, als Vorzugsvariante ausgewählt.

Die Untersuchungen wurden an in der Komplexität gesteigerten Funktionsmustern mit einer Bauteildicke bis zu 2 mm erfolgreich durchgeführt und die Praxistauglichkeit des entwickelten Ver-

fahrens an zwei dünnwandigen FVK-Demonstratoren erfolgreich erprobt. Die ebenen Verbundplatten wurden durch CNC-Fräsen definiert geschädigt, also alle Fasern in Belastungsrichtung (0°) durchtrennt, was zu einer Resttragfähigkeit von 0 % führte. Die mithilfe des Verfahrens reparierten Proben wurden u. a. im Verbundzugversuch nach DIN EN ISO 527-4 charakterisiert. Unabhängig von dem textilen Herstellungsverfahren des Reparaturpatches konnte dabei eine Bruchkraft in 0°-Richtung von ca. 55 % des ungeschädigten FVK-Referenzmaterials erreicht werden (**Bild 5**).

### Kosten sinken um 80 %

Das entwickelte Verfahren stellt somit einen funktionierenden Prozess zur Reparatur einfach gekrümmter, dünnwandiger CFK-Bauteile bis 2 mm Wanddicke dar. Nach der Reparatur der zuvor vollständig geschädigten Proben konnte damit bei gleichbleibender Bauteildicke eine Tragfähigkeit von über 50 % wiederhergestellt werden. Im Vergleich zum Komplettaustausch des FVK-Bauteils sinken die Kosten um bis zu 80 %.

Für die Reparatur komplexer, mehrfach gekrümmter und dickwandiger 3D-

FVK-Bauteile und die Wiederherstellung einer Tragfähigkeit von mehr als 50 % im Zugversuch besteht allerdings weiterer Forschungsbedarf. Dazu sind simulationsgestützte ausgelegte, anforderungsgerechte 3D-Textilpatches mit freien Fäden und ein sequenziell schichtweiser 3D-Matrixabbau der Reparaturstelle mit dadurch freigelegten Fäden für eine ausreichende Kraftübertragung zwischen Patch und Bestandsbauteil zwingend erforderlich. ■

### Dank

Das IGF-Vorhaben 19946 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich bei den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel und den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die fachliche Unterstützung sowie die Bereitstellung von Versuchsmaterial. Der Abschlussbericht und weiterführende Informationen sind am ITM erhältlich.

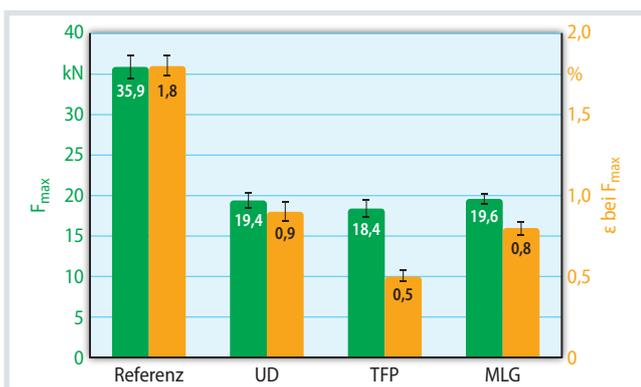
### Service

#### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

#### English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)



**Bild 5.** Bruchkraft ( $F_{max}$ ) und Dehnung bei  $F_{max}$  für die verschiedenen Patch-Varianten: Die UD- und MLG-Zugschnitte erreichen die besten Werte

Quelle: ITM; Grafik: © Hanser