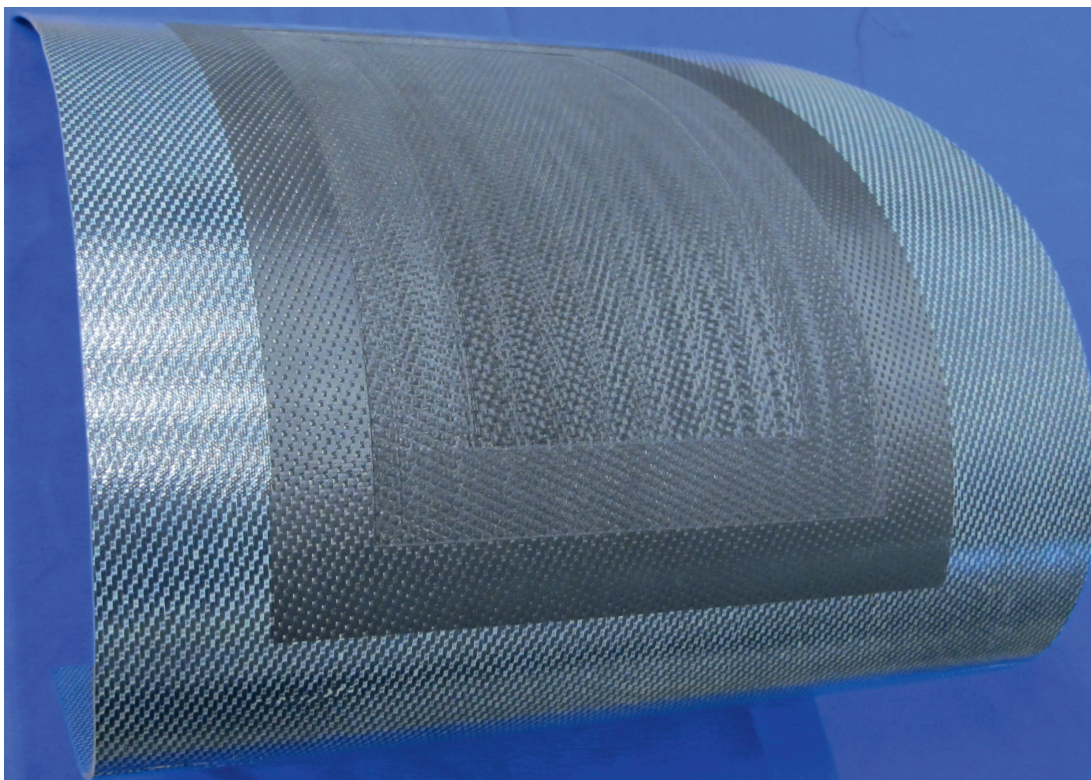


# Laser statt Handarbeit

## Automatisierte Reparatur von carbonfaserverstärkten Kunststoffen

Bei immer mehr Bauteilen kommen carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zum Einsatz. Auch ihre Produktion wird ständig effektiver. Im Schadensfall wird aber weiterhin manuell geschäftet. Bei der Reparatur von CFK ist deshalb eine stärkere Automatisierung wünschenswert. Eine Möglichkeit dafür könnten automatisierte Laserprozesse darstellen.



Stufenschäftung in einem Vorflügel-Demonstrator: Das Schäften stellt eine Herausforderung bei der Reparatur von CFK dar

(© LZH)

Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) hat sich im Leichtbau zunehmend etabliert. Besonders in der Luftfahrt kommt er in großem Umfang zum Einsatz. Moderne Flugzeuge weisen etwa bereits einen Gewichtsanteil von über 50 % CFK auf. Außer in Sekundärstrukturen ist dieses Material auch in immer mehr lasttragenden Primärstrukturen enthalten. Der zunehmende Bedarf an CFK hat zu einer steigenden Produktion geführt. Allerdings ist die Herstellung von CFK-Bauteilen fehleranfällig und erfordert häufig Nacharbeit. Bisher wird diese überwiegend händisch ausgeführt. Sie verlangt jedoch qualifiziertes Personal und kostet

Zeit. Deshalb bietet sich in vielen Fällen der Einsatz automatisierter Prozesse an.

Die Nachbearbeitung ist in drei Phasen unterteilt: Reparaturvorbereitung, Patch-Einbringung und Konsolidierung. Für die Reparaturvorbereitung nutzt gut ausgebildetes Personal üblicherweise druckluftbetriebene Winkelschleifer, mit denen rund um eine Schadstelle im Bauteil das CFK lagenweise entfernt wird. Dadurch entsteht eine Schäftung in gestufter (**Titelbild**) oder konischer Form. In der Folge werden in diese Reparaturlagen sogenannte Patches eingelegt. Das Einbringen der Patches kann als Hardpatch oder im Nasslaminatverfahren erfolgen. Das

Ziel ist die Wiederherstellung des ursprünglichen Lagenaufbaus. Den Abschluss der Reparatur bildet dann die Konsolidierung der Reparaturstelle mittels Wärmebehandlung [1, 2].

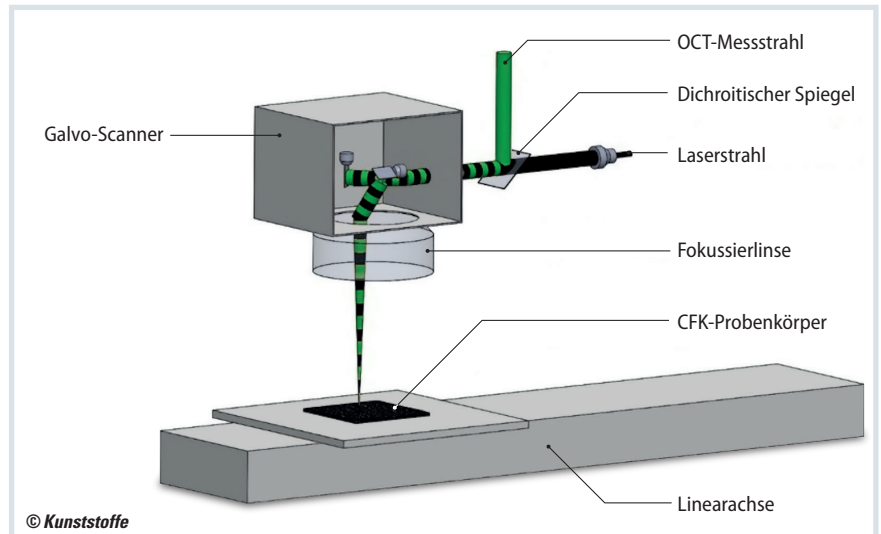
Besonders das Schäften ist eine Herausforderung bei der Reparatur. Die Carbonfasern wirken stark abrasiv auf konventionelle Bearbeitungswerkzeuge. Das führt zu kontinuierlichem Verschleiß und einer sinkenden Prozesseffizienz, weshalb ein regelmäßiger Werkzeugwechsel notwendig ist. Auch der Herstellungsprozess der Bauteile ist mit Schwierigkeiten verbunden. Beim Aufeinander-Ablegen der Fasergewebe oder -gelege können »

laterale Verschiebungen der Rovings auftreten. Unter Druckbeaufschlagung während der Aushärtung oder Vorkompaktierung entstehen diese Verschiebungen teilweise auch normal zur Ablageebene. Solche Ondulationen der Faserlagen müssen beim Schäften berücksichtigt werden, um zu verhindern, dass bei der Reparatur intakte Faserlagen in Mitleidenschaft gezogen werden. Das würde einen bis dahin unnötigen, größeren Reparaturbedarf nach sich ziehen. Außerdem erfordern die konventionellen Schäftungswerkzeuge das Aufbringen von Anpresskräften auf das zu reparierende CFK-Bauteil. Häufig handelt es sich aber um dünnwandige Strukturen mit Materialdicken von wenigen Millimetern, die daher anfällig für Verformungen sind, besonders im fortschreitenden Schäftungsprozess.

### Kurze Laserpulse schonen Material

Während der händische Prozess zur Reparaturvorbereitung weiterhin der Stand der Technik ist, arbeiten verschiedene Stellen an seiner Automatisierung. Das betrifft sowohl die konventionellen, mechanischen Verfahren wie Fräsen und Schleifen als auch jüngere Technologien wie die Bearbeitung mittels Wasser- oder Laserstrahl. Die Ingenieure des Laser Zentrums Hannover e.V. (LZH) untersuchen zusammen mit verschiedenen Partnern Methoden zur Automatisierung der laserbasierten Materialbearbeitung von CFK-Oberflächen. Im Fokus steht dabei die Verknüpfung des Lasereinsatzes mit moderner Prozessbeobachtungstechnik.

Beim Laserprozess am LZH wird durch mehrfaches Abrastern der CFK-Oberfläche mit einem Galvanometer-scanner sukzessive die gewünschte Materialdicke, die meistens der CFK-Lagendicke entspricht, mit dem Laser abgetragen. Dafür kommen kurzgepulste Laserstrahlquellen zum Einsatz. Gegenüber kontinuierlich emittierenden Laserstrahlquellen lässt sich die Wechselwirkzeit zwischen Laserenergie und Material mit Nanosekundenpulsen deutlich reduzieren. Das verhindert eine thermische Überbeanspruchung des CFK, die zur Degradierung der Kunststoffmatrix und zum Bauteilversagen führen kann. Beachtet werden sollte das auch bei der Strahlführung über die Oberfläche. Die überschüssige Energie muss unterhalb der Degradationsschwelle des Kunststoffs bleiben



**Bild 1.** Die entwickelte Anlage kombiniert die Laserbearbeitung mit einem optischen Messsystem für einen automatisierten Laserprozess (Quelle: LZH)

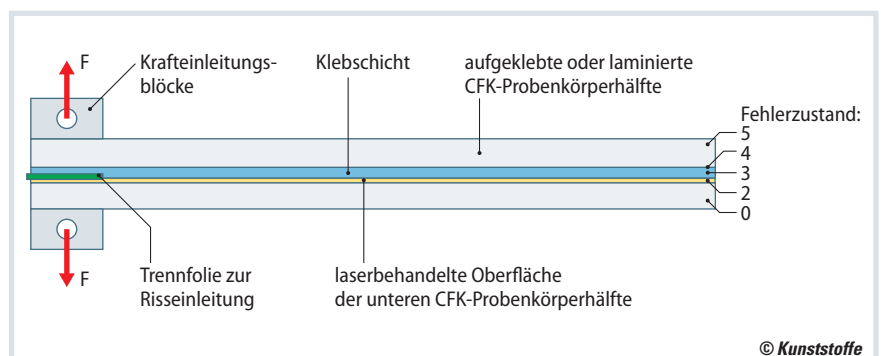
und über die Fasern abgeführt werden, bevor es zu einer kritischen Wärmeakkumulation im Matrixmaterial kommt. Deshalb sollte man eine Strahlführung entlang der Carbonfasern vermeiden und eine orthogonale Führung verwenden [3].

### Optisches Messen für Automatisierung

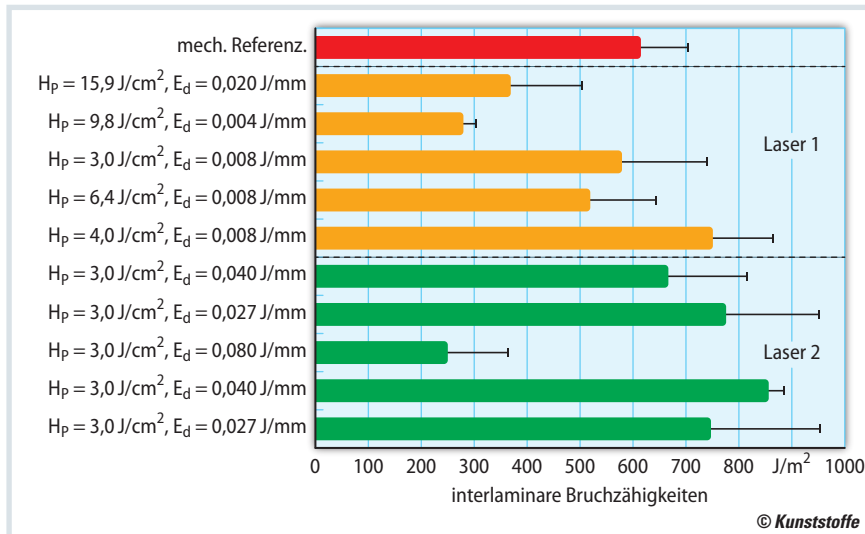
Um einen automatisch gesteuerten Prozess bereitzustellen, wurde in dem Verbundprojekt „ReWork“ der Laserprozess mit der Kurzkohärenz-Interferometrie (optical coherence tomography, OCT) der Precitec Optronik GmbH, Neu-Isenburg, verknüpft (Bild 1) [4]. Dabei handelt es sich um ein sehr präzises Verfahren zur Messung von Weglängenunterschieden. Das Messprinzip basiert auf einem Laserstrahl, der geteilt wird. Die eine Hälfte des Laserstrahls wird entlang eines Referenzwegs, die andere zum Messobjekt geführt. Dort werden die Teilstrahlen reflektiert, zurück-

geführt und der Weglängenunterschied der beiden Strahlen bestimmt. Durch kontinuierliches Messen während des Laserabtrags und dem Vergleich mit einer vor Prozessbeginn aufgenommenen Referenzebene lässt sich die Höhe der abgetragenen Materialdicke überwachen.

Ein großer Vorteil dieses optischen Messprinzips ist die gute Kombinierbarkeit mit der Laserbearbeitung. Beide Systeme sind so konfigurierbar, dass sie mit ähnlicher Wellenlänge ( $\Delta\lambda \leq 30 \text{ nm}$ ) arbeiten. Das ermöglicht eine Strahlführung über denselben Strahlengang. Zu große Differenzen zwischen den Wellenlängen würden zu Abbildungsfehlern in der Bearbeitungsebene führen, sogenannten Farbfehlern. Sie sind auf unterschiedliche Brechungsindizes an den optischen Linsen und Spiegeln zurückzuführen. Die nahezu deckungsgleichen Wellenlängen erzeugen hingegen nur minimale Farbfehler. Durch genaue Jus-



**Bild 2.** Schematische Darstellung der  $G_c$ -Proben mit Markierung der Positionen der fünf Versagenszustände (Quelle: LZH)



**Bild 3.** Aufstellung der erreichten interlaminaren Bruchzähigkeiten zweier Nahinfrarotlaser im Vergleich zu mechanisch bearbeiteten Referenzprüfkörpern (Quelle: LZH)

tierung der beiden Bearbeitungslaser und Messstrahlen lassen sich Positionsfehler in der Bearbeitungsebene im einstelligen Mikrometerbereich erzielen.

Kombiniert werden diese Messtechnik und der Laserprozess mit einem numerischen Prozessmodell. In diesem Modell sind die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern Laserleistung, Scannervorschub, Linienabstand und Größe der zu bearbeitenden Fläche sowie ihr Einfluss auf die Abtragtiefe pro Flächenüberfahrt hinterlegt. Während des sukzessiven Abtrags des CFK wird die Tiefe mit der Sollagendicke der jeweiligen CFK-Lage pixelweise verglichen. Durch den Abgleich dieser beiden Größen lassen sich Bereiche detektieren, die noch nicht die geforderte Abtragtiefe erreicht haben. Anschließend werden die Größen nicht zusammenhängender Bereiche ermittelt und mithilfe des Prozessmodells die Bearbeitungsparameter automatisch modifiziert [5]. Auf diese Weise lässt sich ein automatisch gesteuerter Laserprozess realisieren.

### Die Reparaturqualität bestimmen

Im Rahmen von „ReWork“ untersuchten die Ingenieure des LZH außerdem den Einfluss des Laserprozesses auf die Reparaturqualität. Dafür wurde in Zusammenarbeit mit der Invent GmbH, Braunschweig, entsprechend des Prüfstandards AITM 1–0053 für CFK die interlaminare Energiefreisetzungsrate Mode I ( $G_{Ic}$ ) bestimmt, also die benötigte Energie pro

Fläche zur Rissöffnung bzw. dem Delaminationsbeginn. Dazu entfernten die Wissenschaftler die Harzdeckschicht an der CFK-Oberfläche mit der Laserstrahlung. Auf die freigelegte Faseroberfläche wurde die zweite Hälfte des Coupons analog zu einer CFK-Reparatur laminiert. Als Sollbruchstelle wurde eine Trennfolie eingebracht und dort eine Rissbildung initiiert. Anschließend belasteten die Wissenschaftler die Verbindung an der laserbehandelten Oberfläche auf Schälung. Zur Analyse untersuchten sie die aufgebrachten Zugkräfte und die Entwicklung des Risswachstums. Beim Rissfortschritts unterscheidet man bis zu fünf Zustände, abhängig davon, in welche Bereiche des Prüfkörpers der Riss sich ausbreitet (Bild 2).

Diese Zustände reichen von 0 (Versagen innerhalb der behandelten Probenkörperhälfte) über 2 (Versagen am Übergang zwischen behandelte Oberfläche und der Klebschicht), 3 (Versagen innerhalb der Klebschicht) und 4 (Versagensfall in der Grenzschicht zwischen Klebschicht und unbehandelter Probenkörperhälfte) bis zum Zustand 5, in dem die Probe innerhalb der unbehandelten Probenkörperhälfte versagt. Problematisch ist ein reiner Versagensfall in Zustand 0, da dieser auf eine laserinduzierte Schädigung des Matrixmaterials unterhalb der Oberfläche hindeutet. Diese kann zu einem Versagen des Bauteils durch Delamination führen.

Im Rahmen des Projekts wurden Prüfkörper durch zwei Laserstrahlquellen und mit unterschiedlichen Parametereinstel-

lungen bearbeitet. Als Referenz kamen konventionell, mechanisch bearbeitete Prüfkörper zum Einsatz. Die Ergebnisse in Bild 3 belegen, dass bei geeigneten Prozessparametern interlaminare Bruchzähigkeiten erreicht werden, die der konventionellen Bearbeitung entsprechen oder diese sogar übertreffen.

### Gemischte Versagensfälle

Die Bruchbilder der getesteten Coupons zeigten mit einer Ausnahme gemischte Versagensfälle, die Anteile der Fehlerzustände 0, 3, 4 und 5 aufwiesen. Nur der dritte mit Laser 2 bearbeitete Parametersatz versagte komplett in Zustand 0. Der dominierende Fehlerzustand für Laser 2 war Zustand 4, ein Versagen der Anbindung des Klebfilms an der nicht mit dem Laser behandelten CFK-Couponhälfte. Eine abtragtiefengenaue Reparaturvorbereitung mit Laserstrahlung kann somit zu guten Ergebnissen führen, wenn optimale Prozessparameter gewählt werden.

Eine automatische Steuerung des Laserprozesses ist ein wichtiger Schritt hin zu einer automatisierten, laserbasierten Reparatur von CFK. Dafür besteht für die Lasertechnik noch weiterer Optimierungsbedarf. Als nächstes planen die Ingenieure am LZH, die Schnelligkeit der Datenverarbeitung und die Prozessgeschwindigkeit zu verbessern. ■

### Der Autor

**Dipl.-Ing. Hagen Dittmar** ist seit 2011 als Projektingenieur in der Fachgruppe Verbundwerkstoffe des Laser Zentrums Hannover e. V. tätig; h.dittmar@lzh.de

### Dank

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts „ReWork“ des Luftfahrtforschungsprogramms durchgeführt (Förderkennzeichen: 20Q1521B). Die Förderung erfolgt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

### Service

#### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2020-02](http://www.kunststoffe.de/2020-02)