

# SPECIAL: OBERFLÄCHENTECHNIK

[FAHRZEUGBAU] [MEDIZINTECHNIK] [VERPACKUNG] [ELEKTRO&ELEKTRONIK] [BAU] [KONSUMGÜTER] [FREIZEIT&SPORT] [OPTIK]

## Reparieren statt Ersetzen

### Neuartiger Reparaturansatz für CFK-Bauteile

Der steigende Anteil carbonfaserverstärkter Strukturen erfordert neue, werkstoffgerechte und ökonomische Reparaturverfahren. Im industriellen Maßstab stellt das Schäften der CFK-Bauteile durch CNC-Fräsen mit anschließendem Einkleben eines passgenauen Patches einen praktikablen Ansatz dar.

**G**rundlegend für das Kleben von CFK-Bauteilen ist eine optimale Struktur- und Oberflächenvorbereitung der Fügepartner. Das CNC-Fräsen stellt bei der Bearbeitung von CFK eine effiziente und ausgereifte Technologie dar. Besonders das Stirnfräsen eignet sich zur Herstellung reproduzierbarer Fügeflächen. Dabei profitiert der Anwender von optimierten Fräsworkzeugen mit speziellen Schneidengeometrien und besonders harten Beschichtungen für die Bearbeitung von

Faserverbundwerkstoffen, die in den letzten Jahren auf den Markt kamen.

In einem Forschungsprojekt ging das Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen der Frage nach, wie sich die Wahl des Fräsworkzeugs und der Prozessparameter beim Stirnfräsen auf die Oberflächenbeschaffenheit und die Verklebung von CFK-Bauteilen auswirken. Geprüft wurde dies über den Bezug zwischen den Prozessparametern und den ermittelten Zugfestigkeiten. Zudem er-

mittelten die Aachener Forscher auch den Zusammenhang zwischen Verbundfestigkeit und Oberflächentopographie.

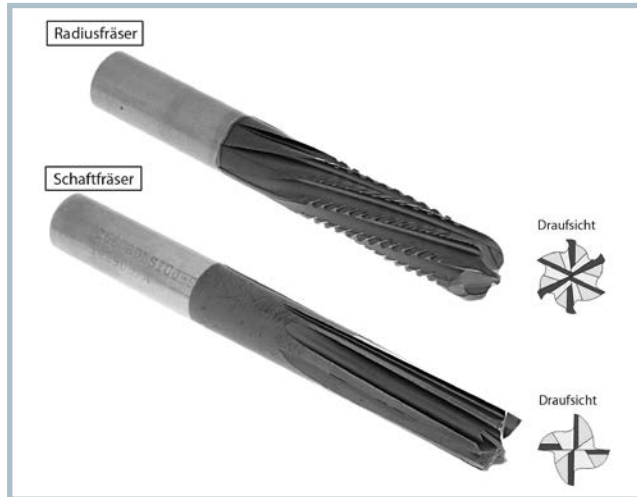
#### Versuchsmethodik von Fräsparametern

Für die Versuche wird ein Faserverbundwerkstoff mit symmetrischem und isotropem Materialaufbau verwendet, der aus Kohlenstofffasern und einer Epoxidharz-Matrix besteht. Für die Verklebung der beiden Fügepartner kommt ein »

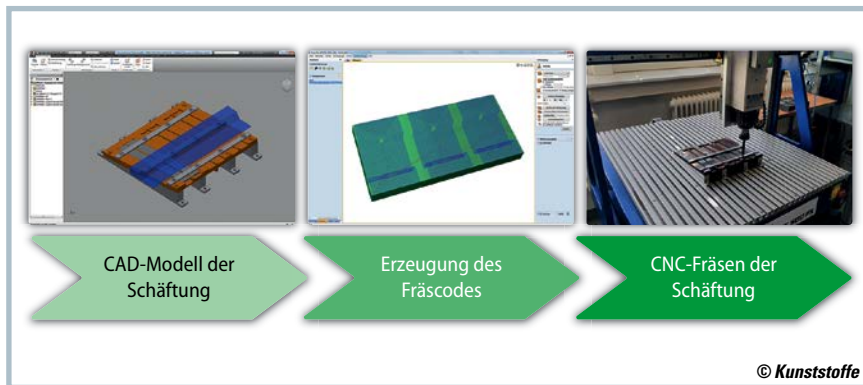
Die Vorbereitung und Vorbehandlung der Kontaktflächen ist beim Kleben einer der wichtigsten Aspekte (© ISF)



**Bild 1.** Der Radiusfräser Hexa Cut 067HOR100-DIP (oben) hat eine halbrunde Stirnfläche, der Schaftfräser Carb Star Twister HC660BD-LS100-DIP (unten) eine flache Stirn-geometrie (© ISF)



ser eine flache Stirngeometrie besitzen (**Bild 1**), durch die die Prozessführung beim Fräsen festgelegt wird. Mit dem Radiusfräser kann eine dreidimensionale Freiform-Bearbeitung durchgeführt werden. Bei dem Schaftfräser findet ein 2D-Fräsprozess statt, d.h. zur Einstellung des Schäftungsverhältnisses muss das Werkstück im entsprechenden Winkel zum Fräser angestellt werden. Beide Fräser haben einen Durchmesser von 10mm und sind diamantbeschichtet. Während des Stirnfräsens sind bei beiden Fräsern jeweils nur vier Zähne in Eingriff, weshalb für beide Fräser die gleichen Prozessparameter verwendet werden.



**Bild 2.** Prozessablauf der Probekörperfertigung beim Fräsen mit Stirnfräser (Quelle: ISF)

2-Komponenten-Polyurethanklebstoff (Typ: Pilogrip Impact 3540 / 3.5, Hersteller: Ashland Industries Deutschland GmbH, Düsseldorf) zum Einsatz. Die Probegeometrie richtet sich nach der Prüfvorschrift ASD-STAN prEN 6066 zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Schäftverbindungen [2].

Abweichend zur Norm wurde die Schäftungslänge verkürzt und ein Schäftungsverhältnis von 1:10 eingestellt. Ein Grund dafür ist, dass zur Untersuchung der Verbundfestigkeit in Bezug zur Oberflächenqualität die Probe eine Bewertung

der Adhäsion des Klebstoffs mit der bearbeiteten Oberfläche ermöglichen muss. Zudem spiegeln kurze Schäftungslängen die geometrischen Einschränkungen bei Reparaturen im Automobilbereich wieder.

Die Fräsarbeiten werden auf einer CNC-Portalfräser (Modell PFE 500-PX, Hersteller: BZT Maschinenbau GmbH, Leopoldshöhe) durchgeführt. Die Bearbeitung der Leichtbauwerkstoffe erfolgt mit speziell optimierten Fräsern (Typ: Fiber Line, Hersteller: Hufschmied Zerspanungssysteme GmbH, Bobingen), wobei der Radiusfräser eine runde und der Schaftfrä-

### Vom CAD-Modell zum Probekörper

Die Probekörperfertigung besteht aus drei Schritten (**Bild 2**). Zunächst wird ein CAD-Modell der gewünschten Schäftungsgeometrie erstellt, das anschließend in eine Frässoftware eingelesen wird. Die Software berechnet in Abhängigkeit des Fräswerkzeugs und der gewünschten Prozessparameter die Fräsbahnen und überträgt diese an die CNC-Maschine.

Neben den beiden Werkzeugen, werden die Prozessgrößen

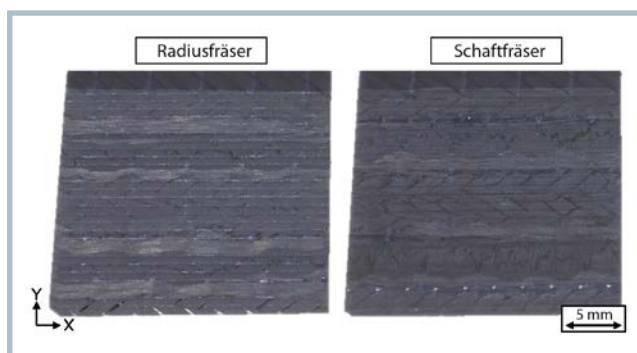
- Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ ,
- Vorschub pro Zahn  $f_z$  und
- Schnittbreite bzw. Bahnabstand  $a_e$  variiert, wobei stets im Gegenlauf gefräst wird.

### Bewertung von makroskopischer Erscheinung und Oberflächentopographie

Bei der optischen Betrachtung der Schäftungen ergeben sich sichtbare Unterschiede zwischen den beiden Bearbeitungsverfahren. Werden unter gleichen Prozessparametern geschäftete Fügeflächen ( $v_c = 600 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,05 \text{ mm/Z}$ ,  $a_e = 1,0 \text{ mm}$ ) betrachtet, so erscheint die mit dem Schaftfräser erzeugte Oberfläche matt und glatt. Die per Radiusfräser geschäftete Oberfläche wirkt trüb und uneben.

Für den Schaftfräser kann das matte Erscheinungsbild mit einer Verschmierung von lose aufliegendem Frässtaub begründet werden. Die planen Schneiden reiben den Frässtaub über die Oberfläche und füllen Unebenheiten damit auf, wodurch zusätzlich ein Glättungseffekt auftritt.

**Bild 3.** Mit gleichen Prozessparametern geschäftete Fügeflächen: Radiusfräser (links) und Schaftfräser (rechts) (© ISF)

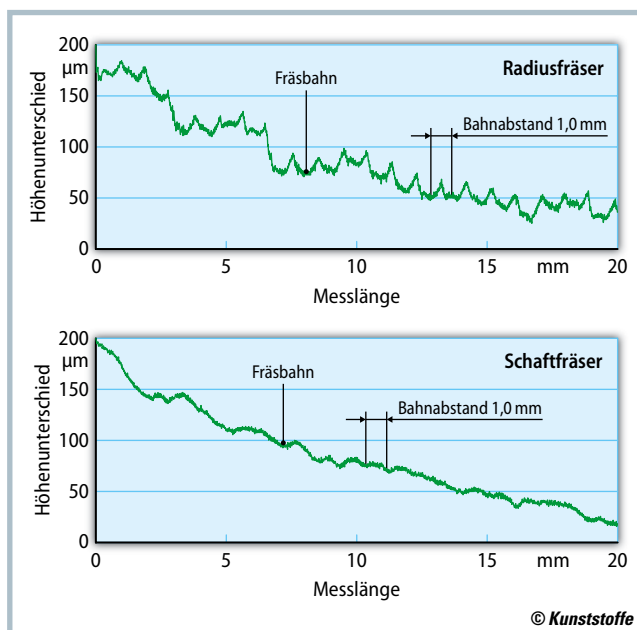


Hingegen sind bei den mit Radiusfräser gefertigten Oberflächen die Übergänge zwischen den einzelnen Fräsbahnen deutlich zu erkennen. Grund dafür sind die halbkugelförmigen Stirnscheiden, die je nach Bahnabstand mehr oder weniger überschüssiges Material stehen lassen. Je größer der Bahnabstand  $a_e$  der Fräsbahnen ist, desto rauer wirkt die Oberfläche (Bild 3).

Die Effekte werden durch die Laser-Scanning-Mikroskopie belegt. In der Profilvermessung in Y-Richtung sind für den Radiusfräser die einzelnen Fräsbahnen als U-förmige Täler zu erkennen (Bild 4). Der Abstand zweier angrenzender Täler entspricht genau dem eingestellten Bahnabstand  $a_e$ . Bei der Profilaufnahme der per Schaftfräser erzeugten Oberfläche sind die Fräsbahnen kaum erkennbar.

### Einfluss der Prozessparameter auf die Zugfestigkeit

Die Einflüsse der Prozessparameter werden anhand von Haupteffektdiagrammen bestimmt, in denen die Zugfestigkeiten über die Prozessgrößen angegeben sind (Bild 5). Zusätzlich wird als Oberflächenkennwert die Rauheit  $R_a$  angegeben. Darüber kann ein Zusammenhang von Oberflächenrauheit und Zugfestigkeit untersucht werden. Die per Radiusfräser gefertigten Proben erreichen Zugfestigkeiten zwischen 165 und 180 MPa. Die per Schaftfräser gefertigten Proben liegen im Bereich von 145 bis 195 MPa. Für beide Fräswerkzeuge beträgt die Standardabweichung rund 7%. Es fällt auf, dass die Zugfestigkeiten der per Schaftfräser gefertigten Proben eine größere Varianz



**Bild 4.** Durch Laser-Scanning-Mikroskopie aufgenommene Profilaufnahmen der geschäfteten Fügeflächen für den Radiusfräser (oben) und den Schaftfräser (unten) (Quelle: ISF)

aufweisen. Dies lässt darauf schließen, dass die Prozessparameter beim Stirnfräsen mit Schaftfräser größeren Einfluss haben, als beim Fräsen mit Radiusfräser.

- Der Zusammenhang zwischen der Rauheit  $R_a$  und der Zugfestigkeit ist aus beiden Diagrammen erkennbar. Mit steigender Rauheit nimmt auch die Zugfestigkeit zu. Diese Beobachtung deckt sich mit der klebtechnischen Theorie aus Fachbüchern.
- Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  führt bei beiden Fräswerkzeugen zunächst zu besseren Ergebnissen in den Zugversuchen. Eine weitere Erhöhung auf 600 m/min bewirkt jedoch einen Abfall der Festigkeitswerte. Der Grund dafür liegt in den starken Rei-

bungskräften zwischen den Schneiden und der Werkstückoberfläche, die bei hohen Schnittgeschwindigkeiten entstehen. Diese bedingen einen höheren thermischen Eintrag in die bearbeitete Fläche. Die Kohlenstofffasern können die Wärme besser ableiten als die Kunststoffmatrix, wodurch die Matrix thermisch geschädigt wird und eine schlechtere Klebstoffanbindung verursacht.

- Ein größerer Bahnabstand  $a_e$  hat bei beiden Fräswerkzeugen positiven Einfluss auf die Ergebnisse der Zugversuche. Beim Radiusfräser sind die Auswirkungen geringer und können bei sehr großen Bahnabständen sogar rückläufig sein. Beim Schaftfräser führt eine Vergrößerung des Bahnabstands »

jedoch zur erheblichen Steigerung der Zugfestigkeiten.

■ Der *Vorschub pro Zahn*  $f_z$  hat bei beiden Fräsern den geringsten Einfluss auf die Ergebnisse der Zugversuche. Jedoch ist erkennbar, dass niedrige Vorschübe pro Zahn zu höheren Zugfestigkeiten führen. Um eine Aussage über die Versagensarten machen zu können, werden nach den Zugversuchen die Bruchbilder ausgewertet. Die Betrachtung der Bruchbilder (Bild 6) zeigt bei allen Serien überwiegend adhäsives Versagen mit einem geringen Anteil von Delamination. Die Delamination beschränkt sich auf ausgerissene Fasern der Laminatlage, die im Winkel von 90° zur Belastungsrichtung orientiert ist.

## Die Autoren

**Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen** ist Leiter des Instituts für Schweißtechnik und Füge-technik (ISF) der RWTH Aachen University.

**Dipl.-Ing. Alexander Schiebahn** ist Oberingenieur der Abteilungen Klebtechnik und thermisches Direktfügen, Mikrofügetechnik, Simulation und wärmearme Fügeverfahren des ISF.

**Bernd Marx, M.Sc.**, ist Teamleiter der Abteilung Klebtechnik am ISF.

**Julia Schoft, M.Sc.**, ist Forschungsingenieurin der Abteilung Klebtechnik am ISF.

**Kristoffer Ringler, B.Sc.**, ist Masterstudent an der RWTH Aachen und hat am ISF seine Bachelorarbeit angefertigt.

## Dank

Die skizzierten Forschungsvorhaben wurden über die Vereinigung zur Förderung des Instituts für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen e.V. der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Allen Institutionen gilt der Dank der Autoren.

Die Ergebnisse stammen aus dem im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) geförderten Projekts „Interaktive Reparaturwerkstatt der Zukunft für Elektromobile in CFK-Bauweise“ (IGF-Vorhaben Nr. 26LN).

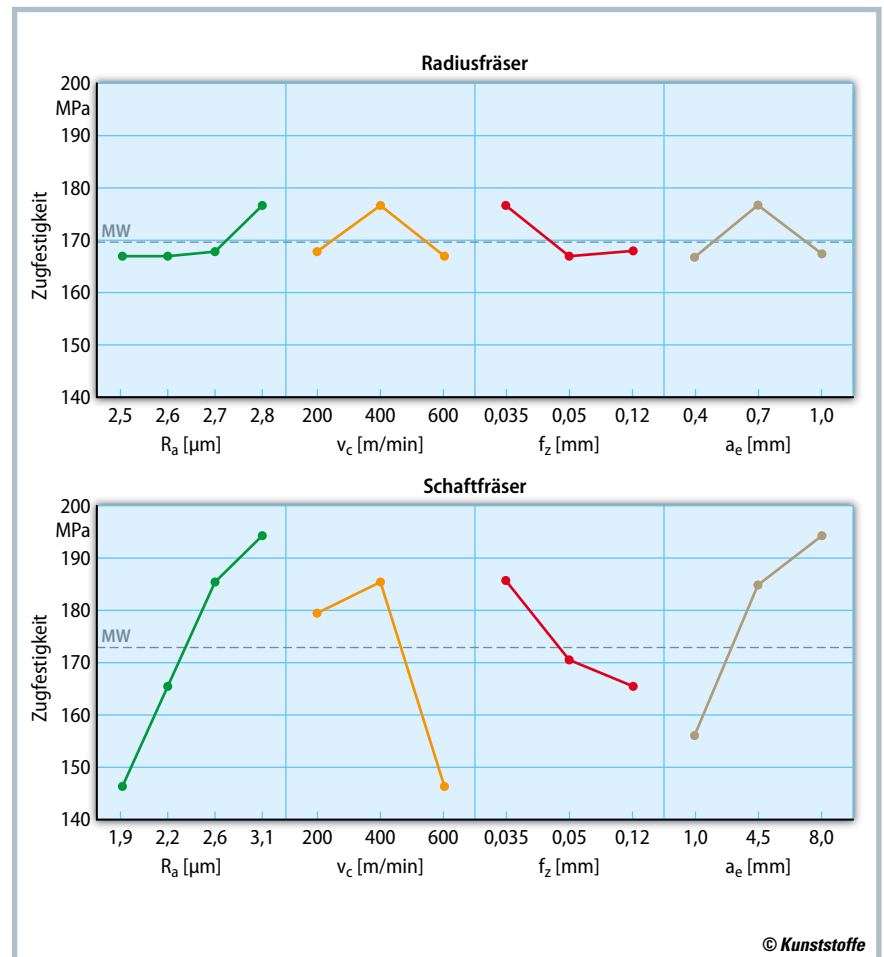
## Literatur & Digitalversion

➤ Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/5110778](http://www.kunststoffe.de/5110778)

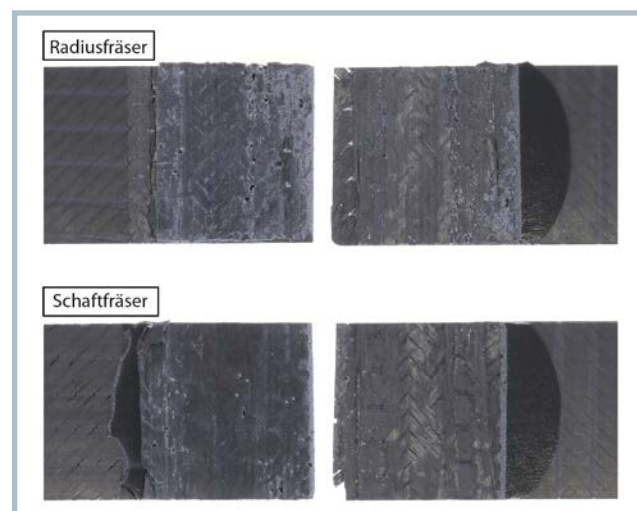
## Fazit

Das Stirnfräsen eignet sich ausgezeichnet zum Erzeugen von Reparaturschäftungen. Im direkten Vergleich von Schaft- und Radiusfräser erreicht der Schaftfräser geringfügig bessere Verbundfestigkeiten. Der Radiusfräser ermöglicht dafür eine

flexiblere Freiform-Bearbeitung. Als Prozessparameter zum Stirnfräsen von CFK sind eine hohe Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , ein niedriger Vorschub pro Zahn  $f_z$  und ein weiter Bahnabstand  $a_e$  empfehlenswert. Die Ergebnisse werden durch Versuche aus den Projekten Rapid Repair und Caire bestätigt [3, 4]. ■



**Bild 5.** Darstellung der Haupteffekte auf die Zugfestigkeiten. Oben sind die Ergebnisse für den Radiusfräser dargestellt, unten die für den Schaftfräser (Quelle: ISF)



**Bild 6.** Exemplarische Bruchbilder von Zugversuchen geprüfter Schäftverbindungen (© ISF)