

# Bohrungsbearbeitung von CFK mit Schleifstiften

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) haben in fast allen technischen Bereichen Einzug gehalten. Die Gründe hierfür sind Forderungen nach höheren Wirkungsgraden und Effizienzen technischer Systeme. Diese sind insbesondere durch eine hohe spezifische Festigkeit und eine große spezifische Steifigkeit bei gleichzeitig guter Korrosionsbeständigkeit zu erreichen. In der Automobil- und Luftfahrtindustrie ergibt sich die steigende Verbreitung der FVK aus dem Trend zur Reduzierung bewegter Massen im Bereich hoher dynamischer Belastungen. Hier wächst der Anteil an faserverstärkten Kunststoffen im Allgemeinen und an duroplastischen FVK im Speziellen kontinuierlich, da diese für ein geringeres Leistungsgewicht sorgen und eine kontinuierliche Reduzierung der Schadstoffemissionen ermöglichen [1].

*von Dirk Biermann und Markus Feldhoff*

Großverbraucher in Europa ist vor allem das Airbus-Modell A380, bei dem ca. 22 % des Strukturgewichtes aus CFK besteht [2]. Auch bei den Modellen A400M und A350 werden große Anteile der Flugzeugstruktur aus Faserkunststoff ausgeführt [3]. Im direkten Vergleich zur Bohrungsbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide hat sich die Bearbeitung von FVK mittels Schleifen bisher insbesondere hinsichtlich erreichbarer Oberflächenqualitäten und auftretender Werkstückschädigungen als ungünstiger erwiesen, sodass dieses Verfahren vornehmlich zum Trennen und Besäumen angewandt wird [4]. Es gilt bisher, dass für eine exakte Materialtrennung möglichst scharfe Schneiden

notwendig sind. Eine wachsende Bedeutung kommt PKD-Werkzeugen zu [5]. Zudem besteht bei der Schleifbearbeitung eine Einschränkung bezüglich der Mindestanforderungen an die Matrixwerkstoffsprödigkeit und den Faserverstärkungsanteil. Für ausreichend feste Matrixwerkstoffe und höhere Faseranteile ist eine Bohrungsbearbeitung durch Schleifstifte hingegen hocheffizient. Insbesondere FVK auf Epoxidharzbasis, welche vornehmlich für hochtechnologische Anwendungen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie genutzt werden [6], sind aufgrund ihrer relativ hohen Matrixfestigkeit sowie ihrer guten Beständigkeit gegen Kühlschmierstoffemulsionen für eine Schleifbearbei-

tung geeignet [7]. Der Einsatz von gesinterten Schleifstiften hat dabei gegenüber der Bohrungsbearbeitung mit Wendelbohrern den Vorteil des Auftretens von Selbstschärfen, die theoretisch wesentlich längere Standwege erreichbar werden lassen.

## **Schleifprozess und Prozessparameter**

Die im Folgenden dargestellten Untersuchungsergebnisse zur Bohrungsfertigung in faserverstärkten Kunststoffen durch das Schleifen fanden mit Hilfe einer fünfprozentigen Kühlschmierstoffemulsion statt, die dem Prozess bei einem KSS-Druck von  $p = 20$  bar durch das Werkzeug zugeführt wurde. Neben den gesinterten

Werkzeugen wurden einschichtig galvanisch belegte Diamantwerkzeuge für die Bearbeitung des 70 Vol.-% kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzes eingesetzt. Im Gegensatz zu den gesinterten Werkzeugen verfügen die galvanisch belegten Werkzeuge über einen wesentlich größeren Kornüberstand, was sich auf den Bindungsverschleiß günstig auswirkt. Während bei dem gesinterten Schleifstift die Kornbindung durch das abrasive KSS-Span-Gemisch zurückgesetzt wird, ist dies bei dem galvanisch belegten Werkzeug durch die größeren Spanräume und die höherfeste Bindung nicht zu beobachten. Nachteilig bei diesem Werkzeug ist, dass es mit einer einzelnen Schicht Schleifkörper

Über den betrachteten Bohrweg ist bei Einsatz der Schleifstifte mit gesinteter Krone kein Kornverschleiß feststellbar, Abb. 1. Durch die Abrasivanteile im KSS-Span-Gemisch, vornehmlich durchtrennte Kohlenstofffasern, erfolgt ein kontinuierliches Zurücksetzen der Bindung. Zugleich erfolgt eine Ausbildung von Kolken und Spantransportrillen sowie Bindungsrücken, vgl. Markierungen in Abb. 1. Einen kontinuierlichen axialen Bindungsverschleiß vorausgesetzt, dürften mit diesem Werkzeugtyp mit einer massiven gesinterten Krone von 10 mm Länge theoretisch Bohrwege von über  $l_f = 100$  m realisierbar sein. Der geringe Verschleiß am Einzelkorn wird auch durch die Verläufe der Prozesskenn-

dargestellten Werte von Vorschubkraft und Drehmoment führen. Mit zunehmendem Verschleiß würden zudem die Anzahl der im Eingriff befindlichen Schneiden steigen und somit auch die Werte der aufgezeichneten Prozesskenngrößen. Die Auswertung des Kraft- und Momentenverlaufes zeigt demgegenüber keinen signifikanten Anstieg. Das Wertenniveau ist erwartungsgemäß verglichen mit Literaturangaben zur Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide bei vergleichbaren Prozesswerten höher.

In Abb. 2 ist der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  sowie des Vorschubes  $f$  auf die axiale Vorschubkraft  $F_z$  sowie das axiale Bohrmoment  $M_z$

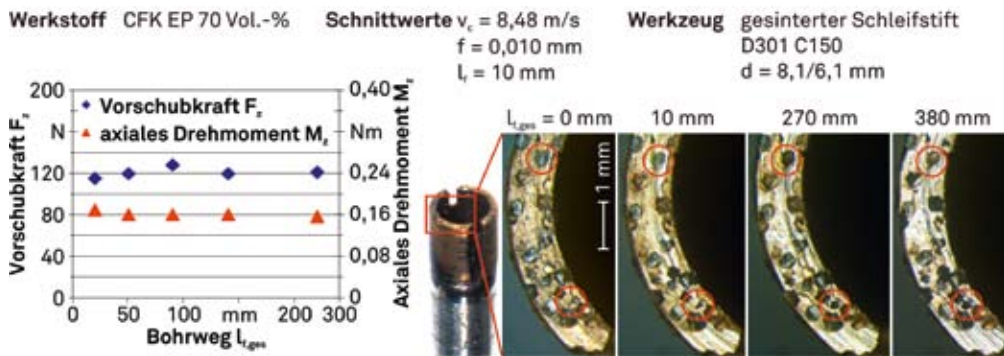


Abb. 1: Einfluss des Bohrweges  $l_f$  auf Prozessgrößen und die Bindung

belegt ist. Das gesinterte Werkzeug könnte demgegenüber, einen radialen Verschleiß vernachlässigend, eingesetzt werden, bis die Schleifstiftkrone über die volle axiale Länge von 10 mm abgebaut worden ist.

größten Vorschubkraft  $F_z$  sowie axiales Drehmoment  $M_z$  gestützt, vgl. Abb. 1. Eine wesentliche Abflachung der im Eingriff befindlichen Diamantkörner würde zu einer Steigerung der Passivkräfte und damit zu einer Erhöhung der

dargestellt. Es zeigt sich ein äußerst geringer Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf diese Prozesskenngrößen, der bereits in der Literatur vor allem bei der Zerspaltung kohlenstoffaserverstärkter Kunststoffe mit geometrisch

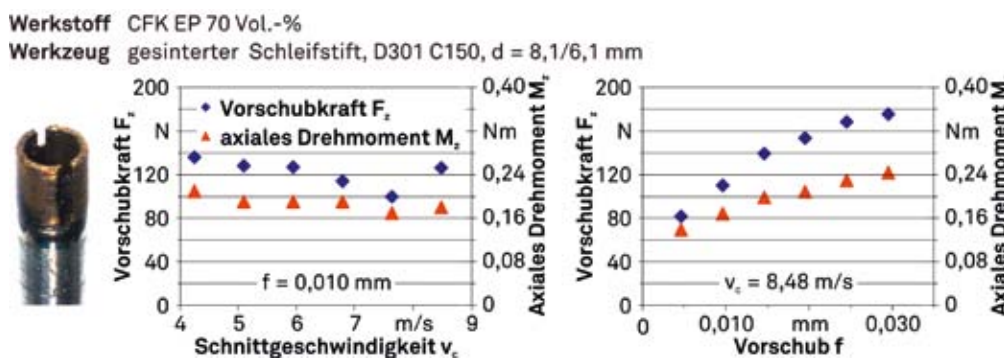
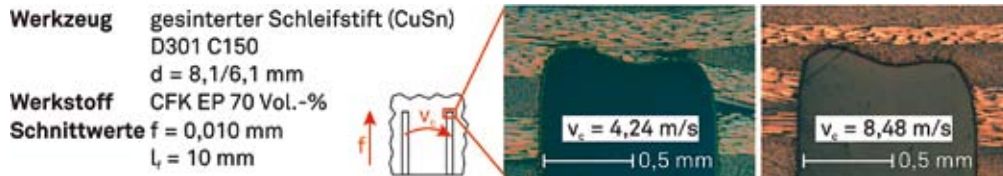


Abb. 2: Variation der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubes

Abb. 3: Schliffbild des Bohrungsgrundes



bestimmter Schneide umfangreich dokumentiert worden ist. Aufgrund der konstanten Prozessparameterwerte ist davon auszugehen, dass im gewählten Parameterbereich keine thermische Entfestigung bzw. keine Zersetzung des Matrixwerkstoffes stattfindet, die Auswirkungen auf den Spanbildungsprozess zur Folge haben. Die Werte von Vorschubkraft  $F_z$  und dem Bohrmoment  $M_z$  weisen mit steigendem Vorschub degressive Verläufe auf. Ursache hierfür sind die sich mit dem Vorschub ändernden Eingriffsbedingungen am Einzelkorn. Zudem gelangt mit steigendem Vorschub eine höhere Anzahl an Diamantkörnern in den Eingriff, da sich der kinematische Schneidenabstand verringert. Hieraus ergeben sich höhere

Werte für die Axialkraft und das Drehmoment, welche die Summe aller Einzelkräfte und Momentenanteile bilden. Auch diese degressiven Verläufe sind in der Literatur insbesondere bei glas- und kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen mit Epoxidharzmatrix umfangreich dokumentiert worden, wobei in den meisten Fällen Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide betrachtet wurden.

Das in Abb. 3 dargestellte Schliffbild zeigt im Bohrungsgrund eine der Wirkzone vorausseilende ringförmige Vertiefung, die durch das axial ausströmende und radial umgelenkte abrasive Span-Kühlschmierstoff-Gemisch entsteht. Auf der Bohrungsaustrittsseite wird die oberste Schicht des

Gewebes zuerst an dieser Stelle durchtrennt. Hierbei entstehende Delaminationen und Faserausbrüche werden durch das austretende Werkzeug größeren Durchmessers abgetragen, wodurch sich eine geringere Werkstückschädigung an der Austrittsseite ergibt. Zudem werden hierdurch die hohen Werkzeugbelastungen und damit -schädigungen reduziert, die bei der Bearbeitung mit Wendelbohrern beim Bohrungsaustritt die höchsten Werte aufweisen. Diese Schädigungen können bei einer Verwendung der Schleifstifte unter KSS-Einsatz durch den beschriebenen Effekt deutlich verringert werden. Der Effekt scheint vor allem durch den Vorschub und den KSS-Druck determiniert zu sein.

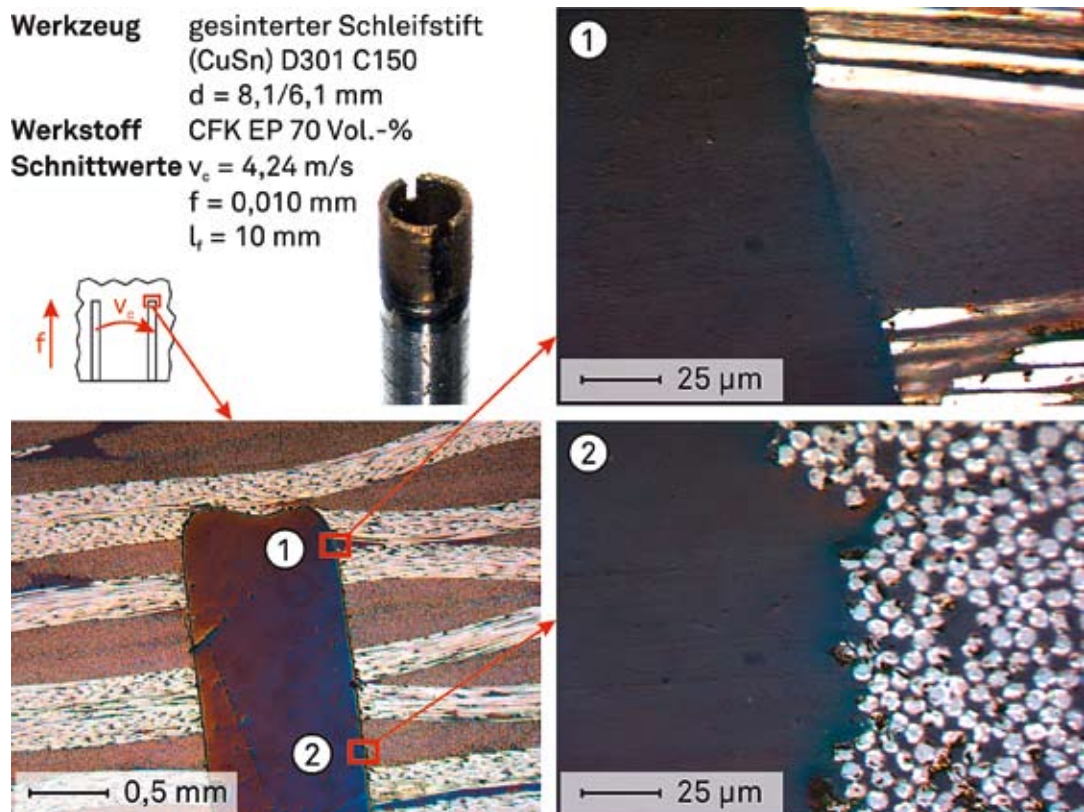


Abb. 4: Materiallografisches Schliffbild der Randzone

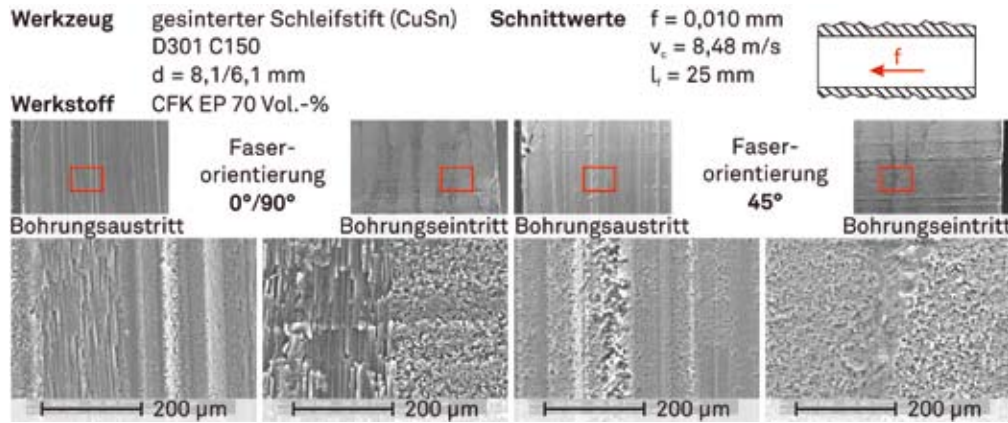


Abb. 5: REM-Aufnahmen verschiedener Faserorientierungen

### Prozessergebnis

Thermische Schädigungen stellen ein wesentliches Problem bei der Bohrungsbearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen dar. Bei den hier schwerpunktmäßig untersuchten Duroplasten ist ein Überschreiten der Zersetzungstemperatur unbedingt zu verhindern. Dabei ist die Verträglichkeit des Matrixwerk-

stoffes und dem jeweils eingesetzten KSS zu gewährleisten. Das hier untersuchte Epoxidharz weist eine relativ hohe Beständigkeit gegenüber Wasser sowie Fetten und Ölen auf und eignet sich daher prinzipiell für den Einsatz von Kühlschmierstoffemulsionen. Der pH-Wert der hier verwendeten Emulsion liegt bei  $\text{pH} = 9,0$ . Die thermischen und mechanischen Schädigungen wurden anhand

lichtmikroskopischer Aufnahmen von Gefügeschliffen bestimmt. Diese Aufnahmen sind in Abb. 4 dargestellt. Die senkrecht zur Mantelfläche liegenden Fasern, dargestellt in Teilbild 1 oben in Abb. 4, werden getrennt, ohne dass ein Herausreißen der Fasern oder ein durch Biegespannung induzierter Bruch der Fasern erkennbar ist. Die parallel zur Schnitttrichtung liegenden

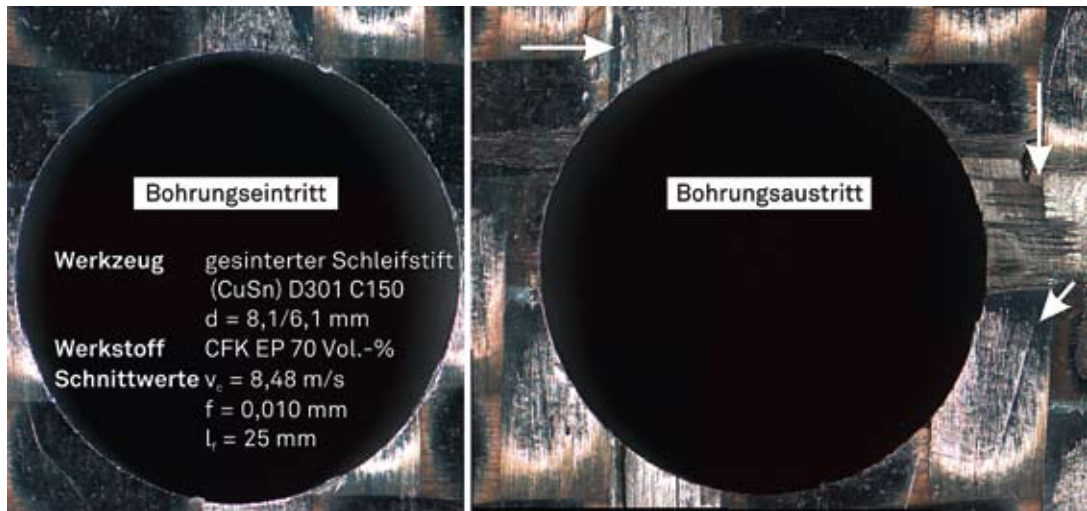


Abb. 6: Delamination der Faserlagen

Fasern, Teilbild 2 in Abb. 4, weisen hingegen teilweise Ausbrüche von Faserbündeln auf. In den meisten Fällen ist auch hier ein innerhalb nur weniger Mikrometer abweichender Verlauf von der Idealkontur erkennbar.

Es sind anhand der Aufnahmen weder Delaminationen im Werkstoffverbund noch thermische Schädigungen erkennbar. Der in Teilbild 1 von Abb. 4 dargestellte Bereich der Bohrungswand mit hohem Epoxidmatrix-Anteil ist aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Harzes als temperaturkritisch einzustufen. Dennoch weist dieser optisch keine Unterschiede zu weiter von der Bohrungswand entfernten Matrixteilen auf. Daher ist davon auszugehen, dass die Zersetzungstemperatur des Matrixwerkstoffes nicht überschritten wurde und die Kühlung durch die innere KSS-Zufuhr ausreichend war. Dies

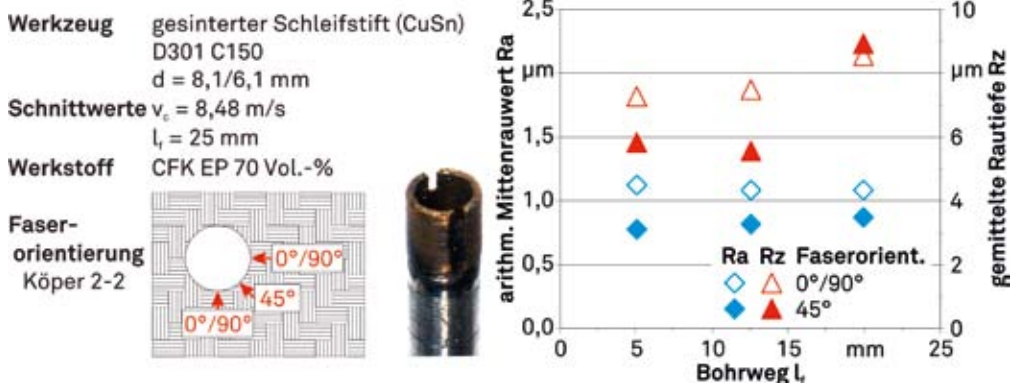
kann auf den hohen Fasergehalt des Verbundwerkstoffes zurückgeführt werden, da Kohlenstofffasern eine relativ gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Eine Wärmeleitbarriere stellt dagegen der Matrixwerkstoff dar, weshalb vornehmlich von einer Wärmeleitung in Faserbündelrichtung ausgegangen werden kann. Darüber hinaus wird ein erheblicher Anteil der Prozesswärme über das Werkzeug abgeführt. Die Diamantschleifkörper weisen eine äußerst hohe Wärmeleitfähigkeit auf. So kann die Prozesswärme durch die ebenfalls gute Wärmeleitung der umgebenden Bronzebindung in die Werkzeugkrone abgeführt werden. Diese wird innen wie außen von der Kühlschmierstoffemulsion umströmt, sodass neben einer direkten Abfuhr der Prozesswärme aus der Spanbildungszone ein erheblicher Anteil über den Schleifkörper an das KSS abgeleitet wird. Bei Werkzeugen

mit geometrisch bestimmter Schneide ist die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück demgegenüber geringer, sodass theoretisch höhere lokale Prozesstemperaturen und damit einhergehende Matrixschädigungen möglich sind. Zusätzlich wird hierbei oftmals auf den Einsatz von KSS verzichtet.

Anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen wurde die Qualität der Bohrungswand beurteilt, Abb. 5. Es ist sowohl in der Nähe des Bohrungseintritts wie auch des -austritts bei unterschiedlichen Faserorientierungen ein Zusammenhalt des Faserverbundwerkstoffes gewährleistet. Delaminationen oder Faserbündelausbrüche sind nur in geringfügigem Maße zu erkennen.

Delaminationen an der Bohrungseintrittsseite sind auch anhand lichtmikroskopischer Untersuchungen nur in einem

Abb. 7: Gemittelte Werte für axialen arithmetischen Mittenrauwert Ra und für die gemittelte Rautiefe Rz



äußerst geringen Maße zu erkennen, Abb. 6. Der Grund für die geringe Delamination an der Eintrittsseite ist eine Abstützung der oberen Gewebelagen, wodurch axiale Kräfte in Vorschubrichtung in den Verbund geleitet werden. Demgegenüber treten an der Austrittsseite der Bohrung deutliche Faserausbrüche auf. Die nach dem Austritt des Kühlschmierstoffes radial in Richtung Bohrungsmitte stehenden Faserbündel werden von dem nachrückenden Werkzeug offenbar nicht vollständig getrennt. Vielmehr bewirken die durch die Stirnfläche des Werkzeuges auf die Fasern und Faserbündel wirkenden Biegespannungen eine Ablösung der obersten Gewebeschicht. Die Einzelfasern (Abb. 6, kleiner Pfeil) bzw. die Faserbündel (Abb. 6, größere Pfeile) lösen sich von der Matrix ab und werden in axialer Richtung gebogen, da hier eine Abstützung durch folgende Gewebeschichten fehlt. Zumeist brechen diese Fasern bzw. Faserbündel dann an der nächsten Bindungsstelle, an der ein senkrecht verlaufender Faserstrang oberhalb der gebogenen Fasern und Faserbündel verläuft.

Aufgrund der stark negativen Spanwinkel stellt das exakte Trennen der Fasern dieser obersten Gewebeschicht eine große Herausforderung dar. Durch eine geeignete Prozessführung ist jedoch eine Minimierung der Delamination denkbar.

In Abb. 7 sind über mehrere Durchgangsbohrungen gemittelte Werte für den arithmetischen Mittenrauwert  $R_a$  sowie für die gemittelte Rautiefe  $R_z$  über den Bohrweg  $l_f$  aufgetragen. Es ergeben sich Abweichungen dieser Werte in Abhängigkeit der Faserorientierung, die auch vielfach in der Literatur beschrieben wurden [8]. So sind die Werte für eine 45°-Faserorientie-

rung niedriger als die Werte, die senkrecht bzw. parallel zur 2-2-Körper-Gewebeorientierung ermittelt wurden. Die Standardabweichung dieser Messdaten liegt bei  $R_a < 0,14 \mu\text{m}$  bzw.  $R_z < 0,85 \mu\text{m}$ , sodass eine Abhängigkeit von der Faserorientierung angenommen werden kann.

Die rasterelektronischen Aufnahmen zeigen eine Delamination der letzten Gewebelagen etwa 0,2 mm vom Bohrungsaustritt entfernt, Abb. 8, Teilbild 2. Hier sind zudem Ausbrüche erkennbar, die jedoch über die gesamte Bohrungsoberfläche betrachtet selten auftreten. In Teilbild 1 sind außerdem deutlich Spuren der sprödharten Spanbildung zu erkennen, die allgemein für eine relativ homogene Oberflä-

che der erzeugten Bohrung sorgen. Neben der Spanbildung wird die Oberfläche durch das oben angesprochene abrasive KSS-Span-Gemisch beeinflusst. Bei Austritt der Werkzeugstirnfläche wird der KSS nicht mehr an der Bohrungswand vorbeigeführt. Dies ist anhand rasterelektronischer Aufnahmen deutlich erkennbar, Abb. 8, Teilbild 3. Dargestellt ist der Bereich, in dem sich bei Austritt des Werkzeuges die Fugestelle zwischen Werkzeugkrone und Schaft befindet. Im rechten Teil des Bildes sind die axial verlaufenden Spuren abrasiver Beanspruchung der Bohrungswand feststellbar. Die diese Beanspruchung beeinflussende Größen stellen der KSS-Druck sowie der Volumenstrom dar. Die Auswirkungen dieser

**Werkzeug** gesinterter Schleifstift (CuSn) **Schnittwerte**  $f = 0,010 \text{ mm}$   
D301 C150  $v_c = 8,48 \text{ m/s}$   
 $d = 8,1/6,1 \text{ mm}$   $l_r = 25 \text{ mm}$

**Werkstoff** CFK EP 70 Vol.-%

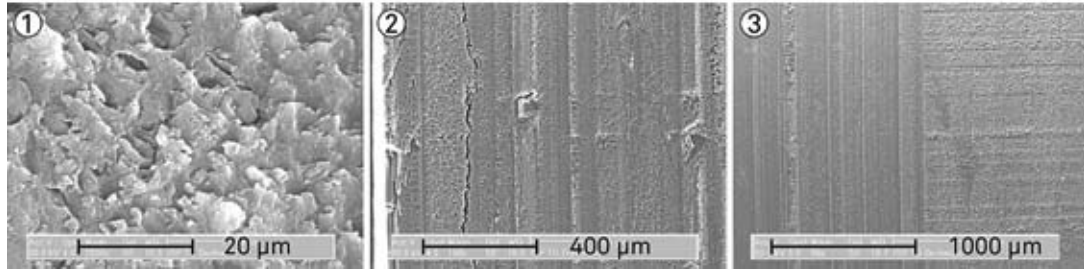


Abb. 8: Rasterelektronische Aufnahmen der Bohrungswand

fehlenden Glättung durch den KSS sind auch anhand der hohen Rauheitswerte im Bereich des Bohrungsaustritts erkennbar, Abb. 7.

Die Grenzen der Einbringung von Bohrungen in FVK mit Schleifstiften werden vornehmlich durch den Matrixwerkstoff determiniert. Bei Versuchen in 30 Vol.-% glasfaserverstärktem, teilkristallinem, thermoplastischem Kunststoff (PA66) setzten sich die Spanräume nach wenigen Millimeter Bohrweg zu, was zu hohen Prozesskräften von bis zu  $F_z = 250 \text{ N}$  führte. Problematisch ist generell das Vorhandensein

von Gleitebenen in thermoplastischen Matrixwerkstoffen, welches insbesondere bei der Zerspanung mit geometrisch unbestimmten Schneiden eine Spanbildung erschwert. Die Materialtrennung durch Schleifen ist daher vor allem für Duroplaste, wie dem zuvor verwendeten Epoxidharz, sinnvoll. Möglich wäre die Einbringung von Bohrungen in FVK mit thermoplastischer Matrix, wenn diese über einen wesentlich höheren Fasergehalt verfügt und somit einen frühen Spanbruch ermöglicht.

### Zusammenfassung

Die hier dargestellten Untersuchungen zur Bohrungsbearbeitung in kohlenstofffaserverstärktem, duroplastischem Kunststoff durch Schleifstifte zeigen die prinzipielle Eignung des Schleifverfahrens zum Einbringen von Bohrungen auf. Durch die hohe Abrasionsbeständigkeit der Diamantkörner sind lange Standwege erzielbar. Es ergeben sich ein geringer Einfluss der Schnittgeschwindigkeit und ein hoher Einfluss des Vorschubes auf die Prozesskräfte. Hinsichtlich des Bearbeitungsergebnisses

sind keine thermischen Einflüsse auf den Matrixwerkstoff festzustellen. Das abrasive KSS-Span-Gemisch beeinflusst den Bohrprozess und die Oberfläche der Bohrungswand. Es zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Faserorientierung auf die Oberflächenrauheit der Bohrungswand. Eine Herausforderung stellt die Vermeidung von Delaminationen insbesondere am Bohrungsaustritt dar. Für ein umfassendes Prozessverständnis, einen optimalen Werkzeugaufbau und eine optimale Prozessführung sowie das Aufzeigen insbesondere der werkstoffseitigen Verfahrensgrenzen sind weitere umfassende Untersuchungen notwendig.

- [1] Janssen, B.: Kunststoffe im Automobilbau. Ingenieur-Werkstoffe 9 (2000) 2, S. 8–12.
- [2] Räckers, B.: Verbundwerkstoffe im Airbus. In: Degischer, H. P. (Hrsg.): Verbundwerkstoffe: 14. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wiley-VCH Weinheim, (2003), S. 55–57.
- [3] P. Müller-Hummel, J. Richter, B. Möller: Neue Werkstoffe fordern neue Allianzen. WB Industrielle Metallbearbeitung, 141 (2008) 10, S. 66–67.
- [4] Tönshoff, H. K.; Hohensee, V.: Bearbeitung faserverstärkter Kunststoffe durch Umrissfräsen. Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 81 (1986) 2, S. 106–111.
- [5] Ferreira, J. R. et al.: Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials. J. Mat. Proc. Tech. 92-93 (1999), S. 135–140.
- [6] Ehrenstein, G. W.; Pongratz, S.: Beständigkeit von Kunststoffen – Band 1. Carl Hanser Verlag München (2007).
- [7] Oberbach, K.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. Carl Hanser Verlag München (2001).
- [8] König, W.; Graß, P.: Bohr- und Fräswerkzeuge für faserverstärkte Kunststoffe. VDI-Z 128 (1986) 3, S. 71–75.

#### INFO

Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann, Jahrgang 1963, studierte Maschinenbau an der TU Dortmund und promovierte auf dem Gebiet der spanenden Fertigung. Während seiner achtjährigen Industrietätigkeit war er als Bereichsleiter Fertigung bei der Dr. Schrick GmbH in Remscheid für die Produktion von Verbrennungsmotoren verantwortlich. Seit April 2007 ist er Leiter des Instituts für Spanende Fertigung (ISF) an der TU Dortmund.  
Dipl.-Ing. Markus Feldhoff, geb. 1980, studierte Maschinenbau an der TU Dortmund und ist seit November 2007 wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Spanende Fertigung.

Institut für Spanende Fertigung  
Technische Universität  
Dortmund  
Baroper Str. 301  
D-44227 Dortmund  
Tel: +49-231-755-2784  
zabel@isf.de  
www.isf.de