

K. Wegener, M. Henerichs, R. Voß, D. Harsch

Schneidkantenmikrogeometrie entscheidet über die Standzeit beim Bohren von CFK

■ Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) verfügen über eine herausragende Steifigkeit und Festigkeit bei geringem Gewicht. Diese Eigenschaften macht die Verwendung des Werkstoffes insbesondere für die Luftfahrtindustrie, den Automobilbau, Sportgerätehersteller sowie die Energiegewinnung interessant. Das Material ist sehr abrasiv in der Zerspaltung, es erfordert hochharte Schneidwerkstoffe bei gleichzeitig scharfer Schneidkante^[1]. Diamantbeschichtete Bohrwerkzeuge zeigen klassischerweise eine gute Schneidleistung, solange die Schneidkante von der Diamantschicht geschützt ist. Mittels einer leistungsfähigen Charakterisierung der Schneidkantenmikrogeometrie ist es nun gelungen, neuartige Bohrwerkzeuge zu entwickeln, bei denen trotz Verschleiß der Diamantschicht die Schärfe der Schneidkante erhalten bleibt.



Prof. Dr.-Ing. Konrad Wegener
Institutsleiter des Institutes für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF) an der ETH Zürich



Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Marcel Henerichs
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWF und beschäftigt sich mit der Zerspaltung von CFK für die Luftfahrtindustrie



M. Sc. Robert Voß
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWF und beschäftigt sich mit der Zerspaltung von CFK für die Luftfahrtindustrie



B. Sc. David Harsch
Masterstudent am IWF

Bohren und Fräsen sind häufig eingesetzte Bearbeitungsverfahren für CFK-Werkstoffe. Die Werkzeuge sind während der Zerspaltung einem erheblichen abrasiven Verschleiß ausgesetzt, in der Konsequenz wird vornehmlich Diamant als Schneidstoff eingesetzt. Sowohl Hartmetallwerkzeuge mit einer nanokristallinen CVD-Diamantschicht als auch PKD-Werkzeuge finden breite Anwendung in der spannenden Bearbeitung von CFK. Während PKD-Werkzeuge klassischerweise über eine bessere Standzeit verfügen und nachgeschliffen werden können, zeichnen sich diamantbeschichtete Hartmetallwerkzeuge durch ihren geringeren Preis und die besseren Adaptionmöglichkeiten der Werkzeuggeometrie aus.

Beide Werkzeugarten erleben eine intensive Weiterentwicklung der jeweiligen Technologie. PKD-Werkzeuge können beispielsweise mittels Laser effektiv, mit minimalen Schneidkantenradien und ohne Kornschädigungen bearbeitet werden^[1,2]. Vor gut 10 Jahren erhältliche Diamantschichten zeigten in vielen Fällen noch eine un-

zureichende Standzeit aufgrund mangelnder Schichthafung^[3,4]. Bei geeigneter Wahl der Werkzeuggeometrie tritt bei aktuell erhältlichen Diamantschichten kein vorzeitiges Abplatzen mehr auf^[5]. Aktuelle Forschung und Produkte im Bereich der Diamantschichten zielen auf eine weitere Steigerung der Schichthafung sowie der Werkzeugstabilität, geringeres Risswachstum innerhalb der Schicht sowie höhere Applikationsraten im Beschichtungsprozess. Diese Weiterentwicklungen ermöglichen leistungsfähigere und ökonomischere Werkzeuge für die CFK-Bearbeitung. Die gewählte Werkzeuggeometrie beeinflusst die Standzeit der Werkzeuge massiv. Insbesondere eine aussagekräftige Evaluation der Schneidkantenmikrogeometrie hilft in der Weiterentwicklung der Werkzeuge. Die vorliegende Studie zeigt auf, wie die Schneidkantenmikrogeometrie aussagekräftig, robust und wiederholbar evaluiert werden kann. In den Zerspaltungsergebnissen wird am Beispiel der CFK-Bohrbearbeitung aufgezeigt, wie Zerspaltungswerkzeuge mithilfe der Schneidkantencharakterisierung weiterentwickelt werden können.

Standzeit diamantbeschichteter Hartmetallwerkzeuge

Die üblicherweise 6–10 μm dicken Diamantschichten umschließen das Hartmetall für einen begrenzten Standweg, bei einem Bohrungsdurchmesser von 6,35 mm nach dem Stand der Technik für einen Vorschubweg von etwa 3 m^[5]. Hiernach ist die Diamantschicht an der Schneidkante sowie in zunehmendem Maß auf der Freifläche verschlissen, das Hartmetall mit seiner glänzenden Oberfläche tritt deutlich hervor, siehe *Bild 1*. Herkömmliche Werkzeuge zerspanen mit guter Qualität, solange die Hauptschneide von der Diamantschicht geschützt ist. Hiernach fällt die Zerspanungsqualität ab. Der Verschleiß ist üblicherweise sehr gut am Vorschubkraftverlauf abzulesen, *Bild 2* zeigt den Vorschubkraftverlauf schematisch.

Solange die Werkzeugoberfläche von der Diamantschicht geschützt ist, zeigt das Werkzeug einen nur geringen, linearen Anstieg der Vorschubkraft sowie gute Bohrungsergebnisse, siehe *Bild 1*, Phase 1. In Phase 2 zeigen sich erste Stellen auf der Schneidkante, die nicht mehr durch die Diamantschicht geschützt sind, die Vorschubkraft zeigt einen progressiven Verlauf. In Phase 3 liegt das Hartmetall entlang der Schneidkante frei. Die Diamantschicht auf der Freifläche wird in immer stärkeren Umfang abgelöst, und die Freifläche durch das CFK abgeschliffen. Die Schneidkante wird während der Bearbeitung zum Teil um über 100 μm zurückgesetzt, die Mikrogeometrie der Schneidkante verändert sich massiv. Die Vorschubkraft steigt auch in Phase 3 linear an, jedoch mit einer deutlich größeren Steigung als in Phase 1. Aufgrund der hohen Vorschubkraft wird in Phase 3 sowohl der Bohrungskanal als auch der Bohrungsaustritt massiv geschädigt^[6].

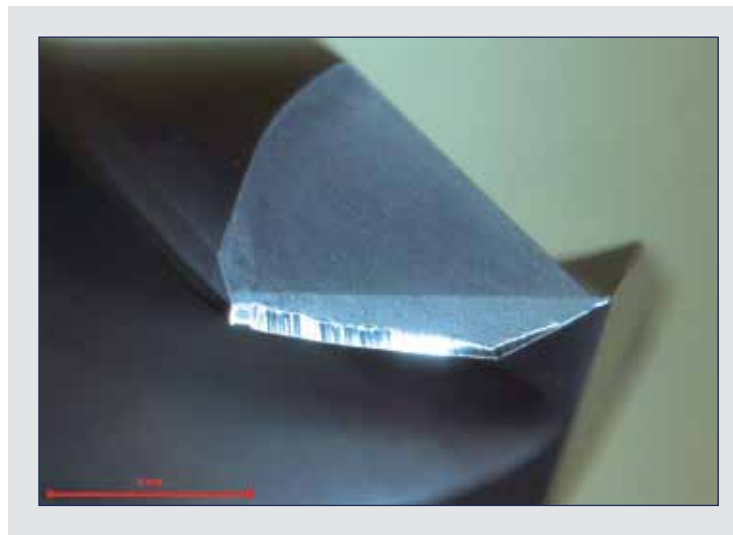


Bild 1
Schneidkante und Freifläche eines Bohrwerkzeugs mit verschlissener Diamantschicht.

Die präsentierte Studie zeigt auf, dass Werkzeuge derart ausgelegt werden können, dass sie in Phase 3 selbstschärfend sind. Der Anstieg der Vorschubkraft kann dadurch soweit begrenzt werden, dass die Werkzeuge bei einem Durchmesser von 6,35 mm für einen Vorschubweg von über 8 m Werkstücke mit guter Bohrungsqualität bearbeiten können. Am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung der ETH Zürich ist ein Analysetool für Schneidkanten, der Cutting Edge Analyser (CEA), entwickelt worden, um die Schneidkantenmikrogeometrie wiederholbar, robust und aussagekräftig charakterisieren zu können. Durch geeignete Auswahl der Analyseparameter kann die Schneidhaltigkeit der Hauptschneide, die für die Bearbeitung von CFK essentiell ist, erfasst werden.

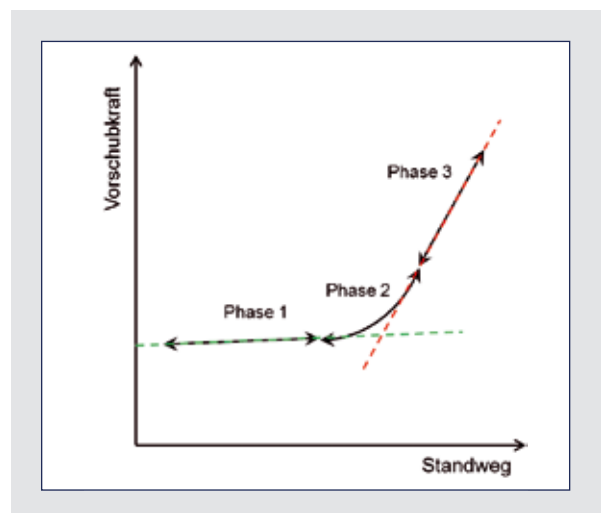
Dickere Diamantschichten stellen keine Alternative dar, um die Standzeit der Werkzeuge zu verlängern. Einerseits würde dies den Werkzeugpreis deutlich erhöhen, da die Schicht nur langsam aufwächst und damit die Werkzeuge deutlich länger in den Beschichtungsanlagen wären. Zum anderen würde eine dickere Schicht den Schneidkantenradius erhöhen, was zu schlechten Bohrungsergebnissen führen würde. Eine scharfe Schneidkante ist eine der Schlüsseigenschaften für gute Zer-

spanergebnisse in der CFK-Bohrbearbeitung^[1].

Der Cutting Edge Analyser (CEA)

Der Cutting Edge Analyser (CEA) wurde entwickelt, um die Schneidkantenmikrogeometrie zu analysieren. Für die Analyse wird die Schneidkante des Werkzeugs an einer oder mehreren Stellen mittels eines 3D-Mikroskops aufgenommen. Aus dem über eine definierte Länge gemittelten Profil entsteht eine Profillinie, siehe *Bild 3*. Der CEA baut auf Arbeiten von Wyen und Wegener^[7] sowie Denkena et al.^[8] auf. Entsprechend Denkena et al. bildet die Methode in einem ersten Schritt eine Geradeninterpolation von Span- und Freifläche bis zum Schnittpunkt dieser beiden Tangenten, siehe *Bild 3*. Anschließend wird äquivalent zu

Bild 2
Prinzipskizze Vorschubkraftverlauf diamantbeschichteter Bohrwerkzeuge in CFK.



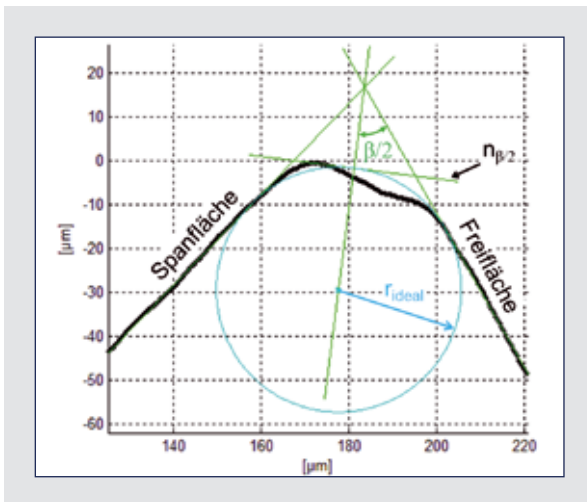


Bild 3
In Cutting Edge Analyser übernommene Analyseinstrumente^[7;8] am typischen Schneidverschleißbild einer CFK-Bearbeitung.

Wyen und Wegener eine Winkelhalbierende zum Keilwinkel, genannt $\beta/2$, eingefügt. Diese Winkelhalbierende wird durch eine Normale zur Winkelhalbierenden, $n_{\beta/2}$, ergänzt. $n_{\beta/2}$ verläuft im CEA als Tangente des Schneidkantenprofils. Abschließend wird ein Kreis, r_{ideal} , tangential an die Geradeninterpolationen sowie $n_{\beta/2}$ eingefügt. Im Folgenden werden Charakterisierungsmerkmale vorgestellt, welche speziell für die CFK-Zerspaltung von Interesse sind.

Bild 4 (links)
Robuste Verschleiß- und Asymmetrie-Ermittlung mittels Verschleißflächen.

Der Verschleiß sowie dessen Asymmetrie werden robust über Verschleißflächen beschrieben, siehe Bild 4. Hierzu werden die eingeschlossenen Flächen zwischen Schneidkantenprofil, Geradeninterpolation und Normalen zur Winkelhalbierenden, $n_{\beta/2}$, ermittelt. Jene Verschleiß-

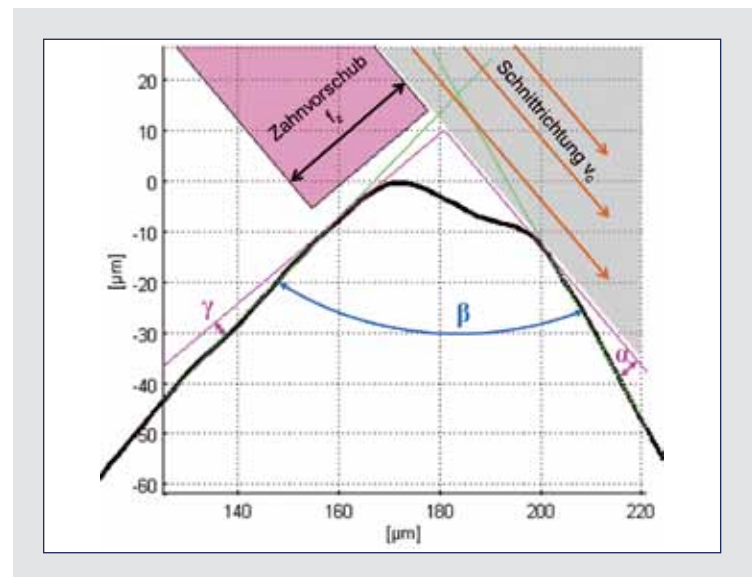
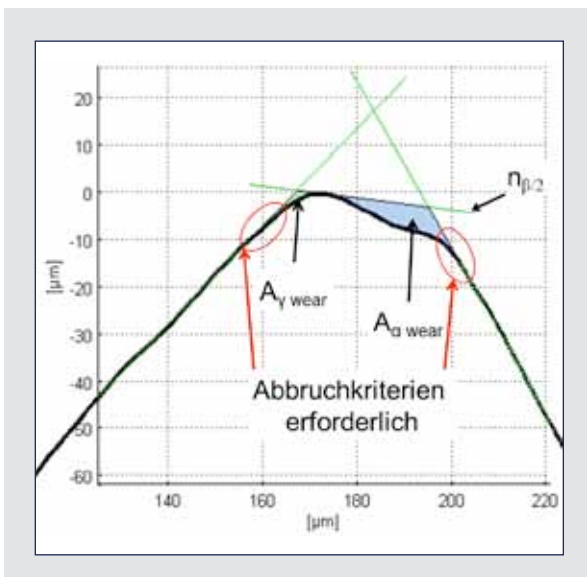
Bild 5 (rechts)
Visualisierung der Eingriffsbedingungen am Schneidkantenprofil.

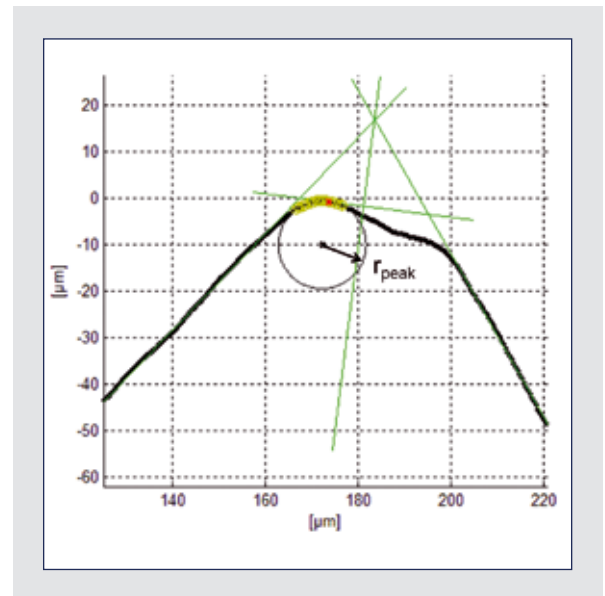
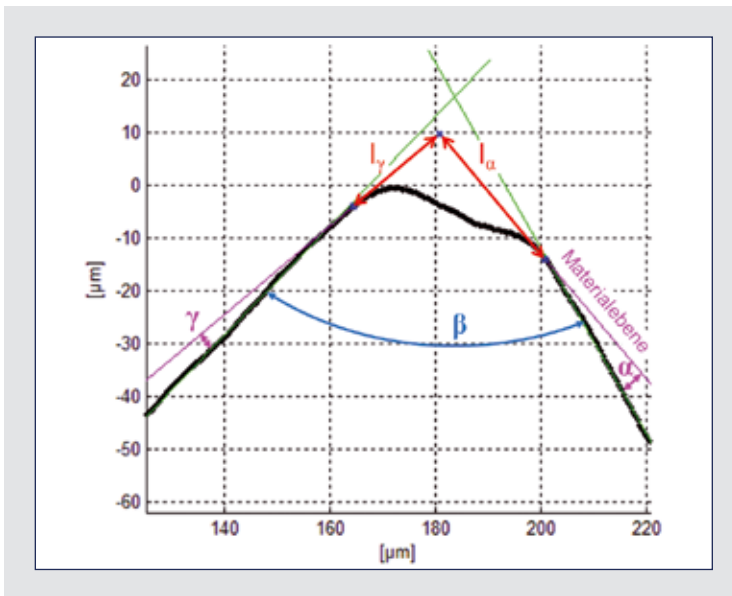
fläche welche zur Freifläche hin geneigt ist, wird als $A_{\alpha, wear}$ in Bild 4 hellblau dargestellt, jene zur Spanfläche geneigt als $A_{\gamma, wear}$ in Bild 4 hellgrün dargestellt. Weiterhin kann äquivalent zwischen dem Umfang des idealen Kreises, r_{ideal} , sowie der Geradeninterpolation und der Normalen zur Winkelhalbierenden, $n_{\beta/2}$, die Fläche A_{ideal} gebildet werden, nicht abgebildet. Für die Bestimmung der Flächen ist äquivalent zur Bestimmung der Längen S_{α} und S_{γ} nach Denkena^[8] ein Abbruchkriterium erforderlich, da die Profillinie sich asymptotisch an die Geradeninterpolationen annähert. Allerdings ist die Größe von Flächen ist im Gegensatz zur Länge von Geraden nahezu unabhängig vom gewählten Abbruchkriterium. Ein Vergleich der beiden Flächen $A_{\alpha, wear}$ sowie $A_{\gamma, wear}$ beschreibt die Asymmetrie des Werkzeugverschleißes, ein Vergleich der Größe einer Verschleißfläche mit A_{ideal} zeigt an, ob die Schneidkante eher rund oder spitz ausgelegt ist. Es empfiehlt sich, für die Koeffizienten Bildung jeweils die Wurzel des Flächenwertes zu verwenden.

Die Schneidkantenanalyse des CEA berücksichtigt erstmals die Eingriffsbedingungen des Werkzeugs. Durch Eingabe des Span- oder Freiwinkels in der Keilmessebene sowie des Zahnvor-

schubs, f_z , können die Eingriffsbedingungen visualisiert werden, siehe Bild 5. Mittels der Eingriffsbedingungen werden jene Längen bestimmt, in denen negative Span- bzw. Freiwinkel vorliegen, im Folgenden als l_{γ} und l_{α} bezeichnet, siehe Bild 6. l_{α} zeigt in Schnittrichtung, l_{γ} senkrecht dazu. Für die CFK-Zerspaltung ist insbesondere l_{γ} von Interesse, in dieser Höhe werden die Fasern nicht sauber durchtrennt, sondern unter die Freifläche gestaucht. Diese tauchenden Fasern erhöhen zum einen die Vorschubkraft und damit die entstehenden Delaminationen. Zum anderen schleifen diese Fasern mit hoher Normalkraft entlang der Freifläche und erhöhen den Verschleiß.

An der Schneidkante werden für die Verschleißbeurteilung im CFK zusätzlich zwei Radien erfasst. Im Bereich des Übergangs von positivem zu negativem Spanwinkel r_{peak} , siehe Bild 7. An dieser Stelle findet die Materialtrennung zwischen CFK-Werkstück und Spänen statt. Ein geringer Radius ist entscheidend für eine kraftarme Materialtrennung. Der zweite Radius, Radius of Surface Generation, r_{sg} , siehe Bild 8, wird vor dem Übergang von negativem zu positivem Freiwinkel erfasst. Hierzu wird der Radius über eine Höhe $6 \mu m$ in Vorschubrichtung, entsprechend der Dicke einer Koh-





lenstofffaser, gemessen. Eine besonders ebene Oberfläche sorgt für eine gleichmäßige Komprimierung des Werkstoffes unter der Freifläche, hier ist ein besonders großer Radius anzustreben.

Qualitätskriterium zur Schneidkantevaluation

Die Bildung von Qualitätskennzahlen im Cutting Edge Analyser ermöglicht eine effiziente Evaluation

- des Werkzeugverschleißes
- des Werkzeugdesigns bzw. der Konditionierung
- der Produktionsqualität des Werkzeugschleifens.

Für das jeweils zu zerspanende Material, aber auch für die Art des Schneidstoffs ist eine adaptierte Qualitätskennzahl zu entwickeln. Die Adaptierung für weitere Werkstoffe ist Gegenstand aktueller Forschung. Die Zerspanungsqualität von CFK mittels PKD-Werkzeugen beispielsweise nimmt mit steigendem $A_{\alpha, wear}$ ab, während dieser Einfluss für diamantbeschichtete Hartmetallbohrer nicht beobachtet werden kann. Die entwickelte Qualitätskennzahl für diamantbeschichtete Hartmetallbohrer lautet:

$$Q_{krit} = w_1 \cdot v_1 \cdot l_\gamma + w_2 \cdot v_2 \cdot \frac{1}{\sqrt{r_{sg}}} + w_3 \cdot v_3 \cdot \frac{1}{1 + \alpha} + w_4 \cdot v_4 \cdot r_{peak}$$

- v_i : Skalierungsfaktoren. Das jeweilige Produkt aus $v_i \cdot x_i$ soll im ungünstigsten Fall 5 nicht überschreiten
- w_i : Gewichtungsfaktoren, es gilt: $\sum w_i = 1$. Die Gewichtungsfaktoren müssen je nach Festigkeit und Steifigkeit des CFK-Materials angepasst werden.
- Werkzeuge mit einem $Q_{krit} < 1$ verfügen über eine Hauptschneide mit guten Schnittbedingungen
- Alle Messgrößen sind in $[\mu m]$ einzufügen, der Winkel α in $[\circ]$

Zerspanungsergebnisse

Die Zerspanungswerkzeuge werden zusammen mit der RUAG Schweiz AG, Heule Werkzeug AG, Dixi Polytool und Oerlikon Balzers Coating entwickelt. Das verwendete unidirektionale CFK-Material mit einer IMA-Faser wird für Flügelstrukturen verwendet und ist für sein besonders abrasives Zerspanverhalten bekannt. Auf eine gewebte Glasfaserdecklage wurde verzichtet, um die Prozesssicherheit für alle Anwendungsfälle sicherzustellen. Getestet wurden bisher total 26 unterschiedliche Werkzeug-

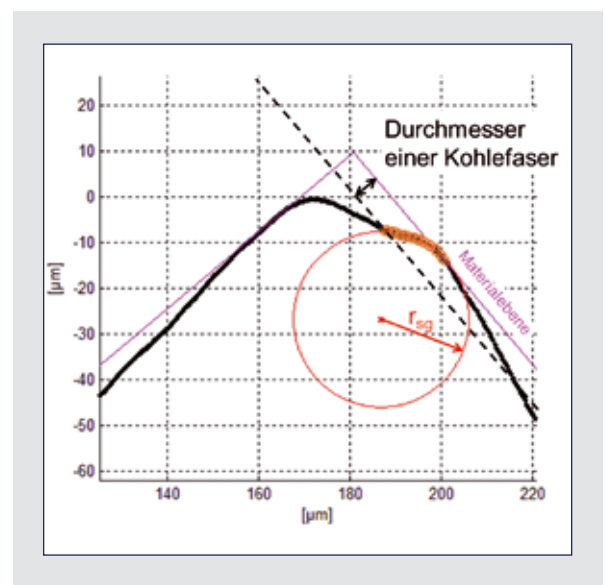
modelle von elf Herstellern. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse sind jeweils ein Werkzeug von Dixi Polytool, eines von Heule sowie das am besten getestete Benchmarkwerkzeug, welches aktuell umfangreich in der Serienproduktion eingesetzt wird. Die drei vorgestellten Werkzeuge sind diamantbeschichtete Hartmetallbohrer, in *Tabelle 1* sind die Prozessparameter dargestellt.

Bild 9 zeigt die Bohrungsausgänge ausgewählter Bohrungen für die drei Werkzeugmodelle. Es ist jeweils sowohl die Anzahl

Bild 6 (links)
Bereiche negativer Span- und Freiwinkel, l_γ und l_α .

Bild 7 (rechts)
Eingefitteter Radius im Bereich der Materialtrennung, r_{peak} .

Bild 8
Eingefitteter Radius, r_{sg} , im Bereich der höchsten Normalkraft auf der Freifläche.



Bohrungsdurchmesser	6.35 mm
Anzahl Bohrungen	1000
Materialdicke	8 mm
Vorschubweg total	8 m
Schnittgeschwindigkeit v_c	$90 \frac{m}{min}$
Vorschub f	$0,06 \frac{mm}{U}$

Tabelle 1
Prozessparameter der durchgeführten Bohrbearbeitung.

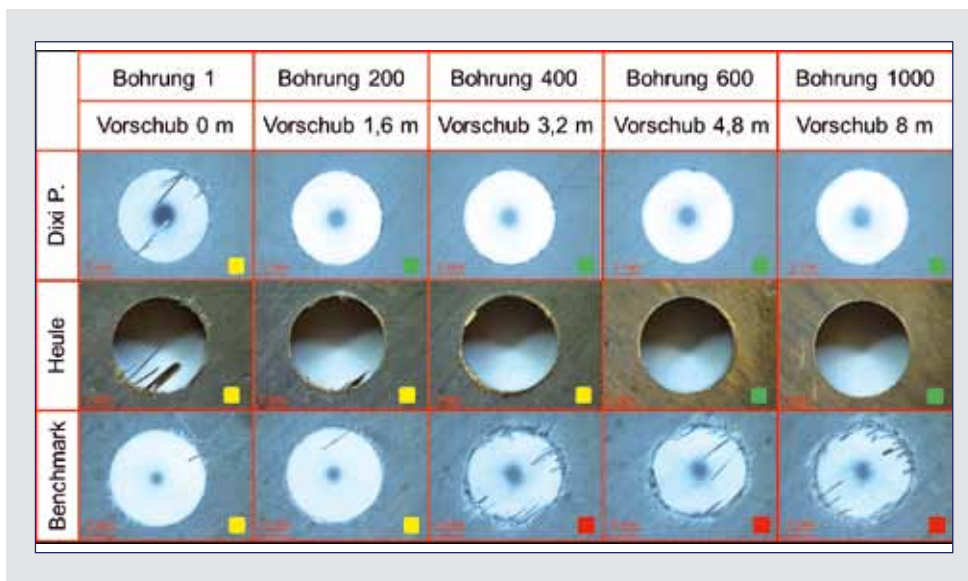


Bild 9
Bohrungsaustritte für unidirektionales CFK.

Bohrungen als auch der bisherige totale Vorschubweg angegeben. Alle Werkzeuge erzeugen eine sehr glatte, einwandfreie Bohrungswand, Eintrittsdelamination tritt nicht auf. Die

farbliche Kennzeichnung neben der Bohrung gibt den Umfang an Austrittsdelamination an. Ein grüner Punkt bedeutet eine Einsetzbarkeit der Bohrung ohne Nachbearbeitung,

ein gelber Punkt bedeutet ein notwendiges Entfernen überstehender Fasern durch eine nachgelagerte Entgratoperation. Im Falle eines roten Punktes reichen Delamination mehr als 1 mm in das Bauteil hinein, die Bohrung ist Ausschuss. Die Bohrwerkzeuge von Dixi Polytool sowie das Benchmarkwerkzeug benötigen eine Einlaufphase von 10–15 Bohrungen, hiernach liefern die Werkzeuge eine Bohrungsqualität wie sie an der 200. Bohrung abgelesen werden kann. Ursächlich für die Einlaufphase ist die erhöhte Oberflächenrauheit der Diamantschicht im Neuzustand.

Wie in Bild 9 zu erkennen, kann das mit Dixi Polytool im Projekt entwickelte Werkzeug aufgrund des selbstschärfenden Effektes der Hauptschneide eine gleichbleibende Bohrungsqualität über 1.000 Bohrungen erzeugen. Das Bohrwerkzeug von Heule zeigt eine lange Einlaufphase von gut 400 Bohrungen. In dieser Phase sind die Bohrungen verwendbar, bedürfen aber einer Nachbearbeitung. Das Benchmarkwerkzeug erzeugt einen sehr guten Bohrungsaustritt von der 15ten bis zur etwa 350ten Bohrung. Hiernach wird das Werkzeug stumpf, die Qualität des Bohrungsaustrittes lässt nach. Der Selbstschärfeffekt wird bei

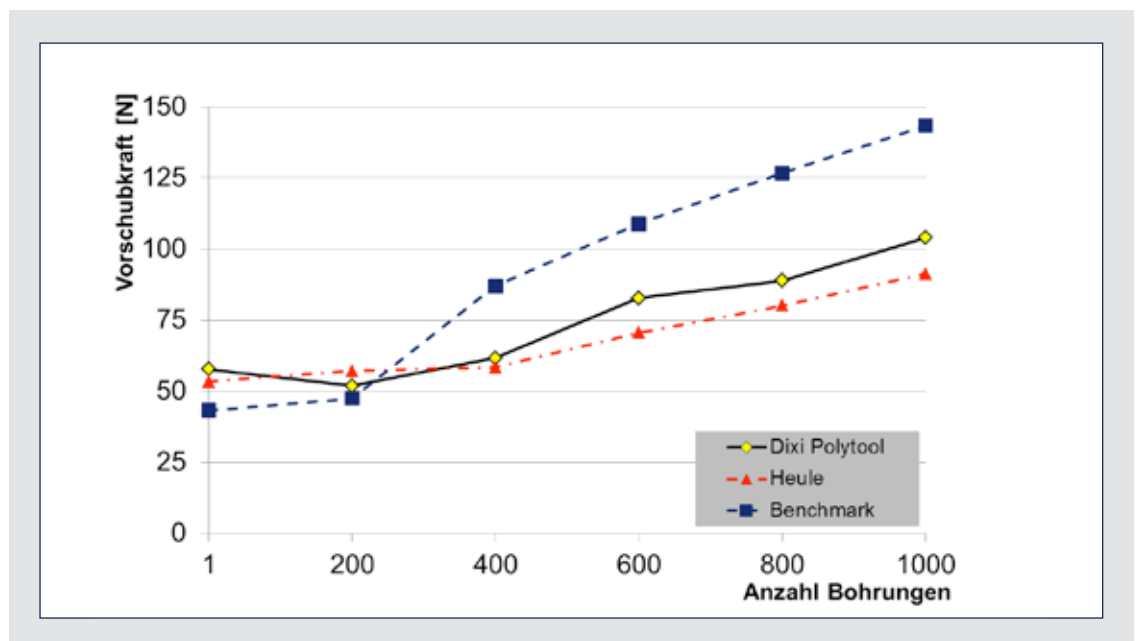


Bild 10
Vorschubkraftkurven diamantbeschichteter Hartmetallwerkzeuge.

Anzahl Bohrungen	Dixi Polytool			Heule			Benchmarktool		
	neu	600	1000	neu	600	1000	neu	600	1000
r_{peak} [μm]	11,72	2,03	2,32	13	6,4	4,4	8,3	6,2	8,6
r_{sg} [μm]	9,83	96,8	5886	14,4	7,1	613,5	9,8	25,2	218,9
l_y [μm]	11,41	50,3	64,52	13,5	47,5	78,8	8,11	55,7	82
Q_{krit} [-]	0,85	0,62	0,70	0,88	0,96	0,90	0,86	1,13	1,33

Betrachtung der Vorschubkraftkurven, Bild 10, deutlich. Das Benchmarkwerkzeug zeigt den in Bild 2 dargestellten typischen Verlauf, bis Bohrung 300 schützt die Diamantschicht das Werkzeug, hiernach steigen die Kräfte deutlich an. Die im Projekt entwickelten Werkzeuge zeigen einen deutlich geringeren Kraftanstieg in Phase 3. Insbesondere das Werkzeug von Heule verzeichnet mit 91 N Vorschubkraft nach 1.000 Bohrungen einen sehr geringen Anstieg der Vorschubkraft.

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Analysewerte des CEA dargestellt. Die Schneidkante wurde jeweils bei 80 % des maximalen Radius vermessen. Im Neuzustand zeigen alle Werkzeuge ei-

nen Q_{krit} -Wert von 0,85 bis 0,88. Aufgrund der Art der Beschichtung haben die Werkzeuge von Dixi Polytool und Heule einen etwas höheren Spitzenradius. Die Werkzeuge von Dixi Polytool und Heule zeigen mit fortschreitendem Standweg einen abnehmenden Spitzenradius r_{peak} , auf diese Weise kann die Zunahme von l_y kompensiert werden, während das Benchmarkwerkzeug bereits während der 600ten Bohrung den Grenzwert von $Q_{\text{krit}}=1$ überschreitet. Das Werkzeug von Dixi Polytool zeigt zur 1.000ten Bohrung noch einen Qualitätskennwert von $Q_{\text{krit}}=0,70$, jenes von Heule einen $Q_{\text{krit}}=0,90$, die Hauptschneiden können das CFK weiterhin zerspannen, ohne umfangreiche Schädigungen einzubringen.

Zusammenfassung

Der Artikel zeigt, dass mithilfe des Cutting Edge Analysers hervorragende Werkzeuge für die Zerspanung von CFK entwickelt werden konnten. Die Werkzeuge sind in Standzeit und Bearbeitungsqualität Wettbewerbsprodukten deutlich überlegen. Mittels des CEA kann das Verschleißverhalten der Hauptschneide umfassend analysiert werden, dies führte zur Entwicklung von Werkzeugen mit einem Selbstschärf-effekt für CFK. Es ist geplant, die Zerspanungsforschung in Zusammenhang mit dem CEA auf weitere Schneidstoff-Werkstoff-Paarungen auszudehnen. Hierzu soll die Methode auch direkt in am Markt erhältliche Messgeräte integriert werden.

Tabelle 2

Ausgewählte Analysewerte des Cutting Edge Analysers.

weitere Infos www.iwf.mavt.ethz.ch

Bildnachweis Verfasser

Danksagung: Wir bedanken uns bei der Kommission für Innovation und Technologie (KTI), die das Projekt „Zerspanung von CFK“ unter der Nummer 11300.3 fördert. Wir danken MTTRF für die Zurverfügungstellung einer Mori Seiki NMV5000 DCG.

Literaturnachweis: [1] Henerichs, M.; Dold, C.; Wegener, K.: Laserbearbeitete Diamantwerkzeuge ermöglichen hocheffiziente Bearbeitung von CFK für die Luftfahrtindustrie, *Diamond Business* 2012 [2] Henerichs M.; Dold C.; Voß R.; Wegener K.: Performance of Lasered PCD-and CVD-Diamond Cutting Inserts for Machining Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP). ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers 2013 [3] Sun F. H.; Zhang Z. M.; Chen M.; Shen H. S.: Fabrication and application of high quality diamond-coated tools. *Journal of materials processing technology* 2002, 129, 435–440 [4] Murphy C.; Byrne G.; Gilchrist M. D.: The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fiber-reinforced epoxy composite materials. *Journal of engineering manufacture* 2002, 216, 143–152 [5] Henerichs M.; Voß R.; Harsch D.; Kuster F.; Wegener K.: Tool Life Time Extension with Nano-Crystalline Diamond Coatings for Drilling Carbon-Fibre Reinforced Plastics (CFRP). *New Production Technologies in Aerospace Industry – 5th Machining Innovations Conference (MIC 2014), Publication in Process* [6] Henerichs M.; Voß R.; Übelin S.; Wegener K.: Analysis of the Work Piece Quality in woven CFRP-Material after a Drilling Operation. 3rd International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC 2014, 80/1, 701–719 [7] Wyen C-F.; Wegener K.: Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium. *CIRP Annals – Manufacturing technology* 2010, 59, 93–96. [8] B. Denkena, G. Byrne, D. Dornfeld: *Advancing Cutting Technology, CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2003, 52(2), 483–507.