

## Analyse von Werkstoffschäden in gewebartig gelegtem CFK-Material nach einer Bohrbearbeitung

Henerichs, M.; Voß, R.; Übelin, S.; Wegener, K.

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF), ETH Zürich, Zürich, Schweiz

### Schlagwörter:

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, Bohrbearbeitung, Werkstückschäden

### Kurzfassung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) finden vermehrt Einsatz in den Bereichen der Luftfahrt, des Automobilbaus sowie der Werkzeugmaschinen. Eine Anpassung der Zerspanungswerkzeuge und -prozesse ist Gegenstand umfangreicher Forschung. Demgegenüber wird die Analyse der Werkstückqualität bis heute mehrheitlich äquivalent der Analyse von Metallen durchgeführt. Die vorliegende Arbeit zeigt auf, welche Werkstoffschäden infolge einer Bohrbearbeitung in gewebartig gelegtem CFK eingebracht werden. Parallel werden unterschiedliche Analyseverfahren evaluiert. Die abschließende Diskussion zeigt auf, inwieweit klassische Qualitätsprüfungen dazu geeignet sind, Werkstückschäden zu bestimmen.

## Analysis of the Work Piece Quality in Woven CFRP-Material after a Drilling Operation

Henerichs, M.; Voß, R.; Übelin, S.; Wegener, K.

Institute of Machine Tools and Manufacturing (IWF), ETH Zurich, Zurich, Switzerland

### Keywords:

Carbon reinforced plastics, Drilling, Workpiece damage

### Abstract

Carbon-Fibre Reinforced Plastics (CFRP) are increasingly used in the field of aircraft and automotive industries as well as the machine tool sector. The adaptation of the machining tools and processes is intensively researched. The work piece analyses are still mostly conducted equivalent to metals. The presented study shows which work piece damages are being inserted into woven CFRP by a drilling process. An evaluation of the different analysing methods is being presented. In the subsequent discussion the suitability of the different methods is being analysed.

## 1 Einleitung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) gehören in der Industrie aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitig geringem Gewicht zu den Hochleistungswerkstoffen. In Faserrichtung erreichen sie eine 3 bis 15fach höhere Zugfestigkeit und einen 2- bis 3-mal höheren E-Modul als Aluminium. Diese Eigenschaften in Verbindung mit einer um 40 Prozent geringeren Dichte verglichen mit Aluminium sind die Gründe für eine immer stärkere Verwendung in den Bereichen der Kleinserien- oder Einzelproduktionen bei Sportgeräteherstellern, im Motorsport oder in der Luft- und Raumfahrtindustrie [1]. Um sich auch in einem großen Markt wie der Automobilindustrie weiter durchzusetzen, wird neben den hervorragenden mechanischen Eigenschaften auch Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit bei der Zerspanung dieses Werkstoffs gefordert [2]. Diese Eigenschaften kann der Werkstoff bis heute nur bedingt erfüllen. Ursache ist unter anderem die nur schwer zu realisierende Kontrolle und Analyse der spanend bearbeiteten Oberfläche hinsichtlich Werkstückschäden. Die spanende Bearbeitung spielt allerdings eine wichtige Rolle auf dem Weg zur Serienfertigung von CFK-Bauteilen. Die hohe Festigkeit der Fasern und die vergleichsweise schlechte Wärmeleitfähigkeit verglichen mit Aluminium sorgen besonders bei trockener Bearbeitung für starken abrasiven Verschleiß am Werkzeug [3-4]. Die Abrasivität sorgt für eine limitierte Standzeit der Zerspanwerkzeuge trotz der Verwendung des hochharten Schneidmaterials Diamant. Mit zunehmendem Verschleiß werden vermehrt Schäden in den Werkstoff eingebracht. Eine exakte Erfassung dieser Schäden ist wünschenswert. Zum einen um die resultierende Schwächung des Werkstoffs abschätzen zu können, zum anderen, um das Standzeitende der Werkzeuge präzise definieren zu können.

In der Metallbearbeitung wird die Bauteilqualität sowie Schädigungsprüfung mittels etablierter und geprüfter Verfahren analysiert. Hierzu gehören Rauheitsmessung, Eindringprüfung, Härtemessung, Messung von Form- und Lagetoleranzen [5, 6]. Mittels dieser Verfahren kann die Eignung eines Bauteils für die geplante Verwendung eingeschätzt werden. Die Qualitäts- und Schädigungsprüfung nach einer Zerspanung für Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen umfasst üblicherweise die Messung von Form- und Lagetoleranzen, Oberflächenrauheit sowie die Erfassung der Randalamination. Die Laminierungsqualität von CFK wird mittels Thermografie und Ultraschall untersucht [7, 8]. Beide Systeme verfügen in den meisten Fällen über eine unzureichende Auflösung für die Untersuchung einer eingebrachten Bohrung. Weiterhin wird die Analysequalität beider Verfahren durch

Reflektionen an der Bohrungswand beeinträchtigt. Eine Prüfung mittels Röntgenverfahren führt im Allgemeinen zu nicht zufriedenstellenden Resultaten, da die Kontrastdifferenz zwischen Faser und Matrix unzureichend ist. Es ist nach dem Stand der Erkenntnisse davon auszugehen, dass mittels der angewendeten Prüfmethoden die Werkstückschädigungen speziell im Bereich der Bohrungen nicht vollständig erfasst werden können. Effekte aufgrund der Anisotropie sowie unterhalb der Oberfläche gebrochene Fasern können nicht erfasst werden [1].

Die vorliegende Arbeit ist der erste von 2 Teilen und beschäftigt sich mit der Analyse von Materialschäden in einem CFK-Werkstück nach einer Bohrbearbeitung. In diesem ersten Teil werden diverse Analyseverfahren vorgestellt und auf ihre Eignung hin untersucht. Ziel ist die möglichst umfassende Evaluation der Werkstückqualität auf mikroskopischer Ebene. Im Detail beschäftigt sich dieses erste Paper mit der Fasermikrogeometrie im Einflussbereich des Bohrprozesses, also entlang der Bohrungswand. In einem zweiten zukünftig zu publizierenden Teil wird die tatsächliche Bauteilfestigkeit dargestellt. Gegenstand der zugrundeliegenden Arbeit ist die Evaluation von Belastungsversuchen, welche die verbleibende Bauteilfestigkeit infolge einer Bohrbearbeitung testen. Fokus der Veröffentlichung werden die Belastungsversuche einer einzelnen Bohrung sein.

## 2 Versuchsaufbau und -material

Der verwendete CFK-Werkstoff ist der in der Luftfahrtindustrie verbautete M21/35%/370H5/AS4C-6K von Hexcel®. Das Gewebematerial verfügt über eine 5HS Webung oder 5-Harness Satin Weave. Bei diesem Atlas-Gewebe überspannt ein Schussfaden 4 Kettfäden und taucht unter einen Kettfaden. Gegenüber der Leinwandbindung zeichnen sich Atlasbindungen durch ihre gute Drapierbarkeit aus. Das Material wird ohne Decklage bearbeitet. Das Material mit einer Gesamtdicke von 8 mm ist aus 28 Lagen zusammengesetzt. Die Bohrungen werden auf einer Mori Seiki NMMV5000 DCG eingebracht. Als Werkzeuge dienen 4 verschiedene Vollhartmetallbohrer mit einer CVD Diamantbeschichtung und einem Durchmesser von 6,35 mm, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der genutzten Zerspanungswerkzeuge

Werkzeug	Design	Frei- winkel* ( $\alpha$ )	Span- winkel* ( $\nu$ )	Spitzen- winkel* ( $\sigma$ )	Getestete Standard
HA2	Spiralbohrer	11°	33°	130°	1000 Bohrungen
D10	Spiralbohrer	17°	5°	130°	800 Bohrungen
Pa5	Spiralbohrer	25°	34°	98°	1000 Bohrungen
C02	Kugelkopfräser	25°	14°	NA	737 Bohrungen

\*Alle Winkel in der Werkstückbezugsebene, gemessen bei 80% des maximalen Radius

Je 3 Werkzeuge eines Designs werden einem Verschleißtest unterzogen. Jedes Werkzeug bringt mit einer einzigen Parameterkombination maximal 1000 Bohrungen in das Material ein. Standzeitkriterium ist die Vorschubkraft. Überschreitet diese den Wert der ersten Bohrung um das Fünffache, wird die Versuchsreihe abgebrochen. Die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  beträgt entweder 90 oder 150 m/min, Der Vorschub  $f = 0,06$  oder  $0,10$  mm/U. Zur Analyse werden, soweit nicht anders angegeben, jene Werkstücke herangezogen, die mit  $v_c = 90$  m/min und  $f = 0,06$  mm/U bearbeitet wurden. Die Faserorientierung  $\Theta$  ist relativ zum Schnittgeschwindigkeitsvektor definiert.

## 2.1 Analysemethoden

Die Werkstücke werden nach Einbringen der Bohrungen mittels diverser Analyseverfahren bewertet. Hierzu werden die Proben zum Teil aufgesägt, um den Bohrkanal zu öffnen. Für die Erstellung einer Schliifprobe, werden Proben in Epoxy eingebettet und angeschliffen. Eine sorgfältige Planung der Analyse Reihenfolge ist daher vonnöten. Die Darstellungsreihenfolge der Ergebnisse orientiert sich hingegen an der logischen Argumentationskette. Die Rauheit des Bohrkanals wird mittels eines Taylor Hobson PGI in Vorschubrichtung taktil vermessen. Aufgrund der Materialdicke von 8 mm beträgt die maximale Messstrecke 6 mm. In Abhängigkeit des Rauheitswertes  $R_a$  reicht die Messstrecke nicht für eine Messung konform DIN EN ISO 4288 aus. Um in allen Fällen eine hinreichende Wiederholbarkeit zu gewährleisten, werden jeweils 3 Messungen im Abstand von 0,1 mm nebeneinander auf der Bohrungswand durchgeführt. Die Unsicherheit des Gerätes beträgt  $U (k = 2) = 2\%$  des Rauheitswertes +4 nm. Durchmessertoleranzen werden mittels

Koordinatenmessgerät (KMG) erfasst, siehe Abbildung 1. Die Messung erfolgt auf 3 verschiedenen Ebenen: bei 1,5 mm, bei 4,0 mm sowie bei 6,5 mm der Gesamtmaterialdicke von 8 mm. Die Unsicherheit des KMG beträgt  $U (k = 2) = 1, 2 \mu\text{m} + L/400$  für einen einzelnen Messpunkt. Ein Auflichtmikroskop wird eingesetzt, um die Oberfläche aufgetrennter Bohrkanäle sowie die Schliifproben zu analysieren. Mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) und Beugungs-Computertomographen (Beugungs-CT) werden die Bohrkanäle untersucht. Abschliessend kommt eine Eindringprüfung zum Einsatz, um den Bohrkanal zu analysieren.

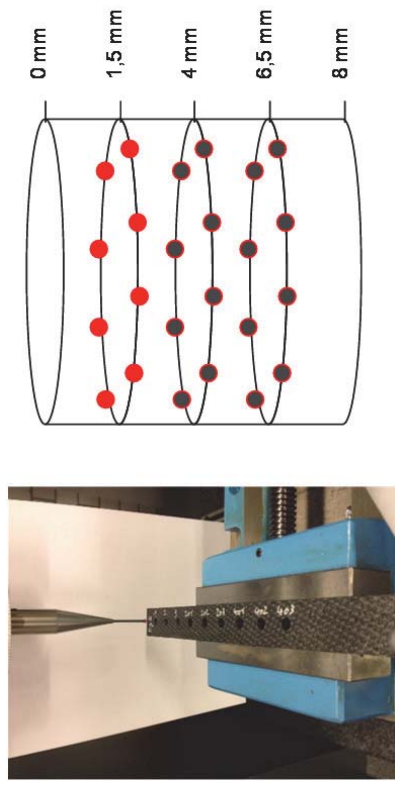


Abbildung 1: Vermessung der Bohrungen mittels Koordinatenmessgerät

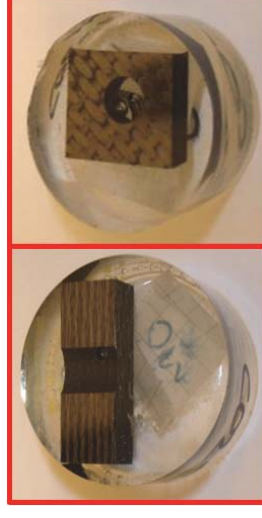


Abbildung 2: Proben Schliifbilder in Vorschubrichtung (links) und orthogonal zur Vorschubrichtung (rechts)

Die Schliifbilder werden sowohl in Vorschubrichtung (äquivalent zu Rentsch et al. [1]) erstellt als auch orthogonal dazu, siehe Abbildung 2. Das verwendete REM ist

ein FEI Quanta 200 FEG. Die Proben werden vorgängig zur Analyse mit einer 5 nm dicken Goldschicht bedampft, da CFK eine unzureichende elektrische Leitfähigkeit aufweist. Mithilfe des REM wird die Oberfläche des Bohrkannals untersucht. In Kooperation mit dem Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) wird CFK-Material in einem Prototyp eines sogenannten Beugungs-CT analysiert. Im Gegensatz zur üblichen Durchlichtanalyse ermöglicht die Erfassung der Beugung von Röntgenstrahlung an einem Gitter die Kontrastbildung zwischen Fasern und Matrixmaterial. Ziel der Analyse ist die zerstörungsfreie, dreidimensionale Darstellung von Rissen und Delaminationen in einem CFK Bauteil. Eine Analyse bedarf einer mehrstündigen Nutzung des Gerätes.

### 3 Versuchsergebnisse

Die Darstellung der Versuchsergebnisse beginnt mit den heute standardmäßig verwendeten Analysewerkzeugen. In den weiteren Unterkapiteln werden die zusätzlichen Analysemethoden evaluiert.

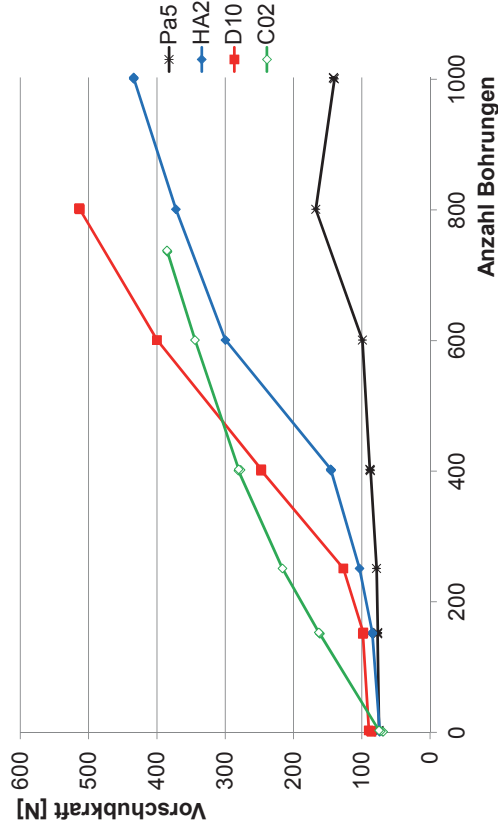


Abbildung 3: Vorschubkräfte ausgewählter Bohrwerkzeuge:  $v_c = 90 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,06 \text{ mm/U}$

In Abbildung 3 sind die Vorschubkräfte der analysierten Bohrwerkzeuge dargestellt. Der Verschleiß am Werkzeug wird für Spiralbohrer mittels der Vorschubkräfte sehr gut abgebildet. Es ist leicht erkennbar, dass Werkzeug Pa5 die geringsten Verschleißerscheinungen zeigt, D10 ist am deutlichsten vom Verschleiß betroffen. Der Kugelkopffräser C02 zeigt deutliches Rattern in der Bohrung, siehe Abbildung 7. Die Schwingungen schädigen die Diamantschicht, die Diamantschicht bricht unmittelbar auf. Hierdurch entfällt jene erste Verschleißphase, bei welcher die Diamantschicht komplett geschlossen ist. Die übrigen Bohrwerkzeuge werden von der Diamantschicht für die ersten 200-400 Bohrungen komplett geschützt, die Vorschubkraft steigt in nur sehr geringfügigem Maße an.

### 3.1 Analyse der Durchmessertoleranzen, des Bohrkannals sowie der Oberflächenrauheit

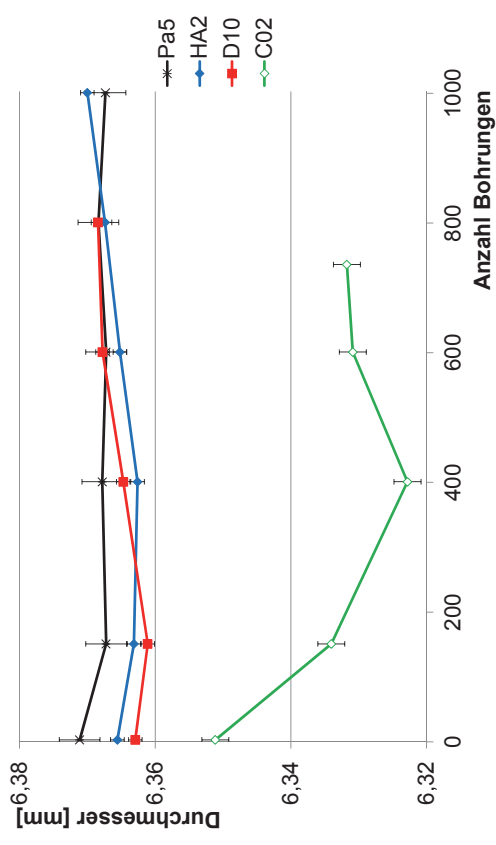
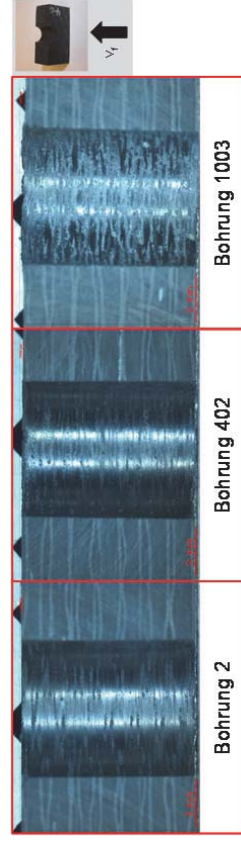


Abbildung 4: Bohrungsdurchmesser ausgewählter Bohrwerkzeuge:  $v_c = 90 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,06 \text{ mm/U}$

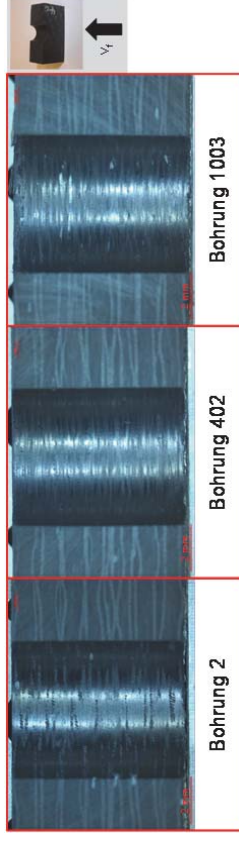
In Abbildung 4 sind die gemessenen Bohrungsdurchmesser der jeweiligen Werkzeuge ersichtlich. Die Spiralbohrer bringen über die gesamte Lebensdauer Bohrungen mit einer geringen Durchmessertoleranz ein, D10 und HA2 erreichen eine IT6, Pa5 eine IT4. Alle Spiralbohrer zeigen zu Beginn eine Reduktion des Bohrungsdurchmessers, nachfolgend entwickeln sich die Bohrungsdurchmesser

unterschiedlich. CVD-Diamantschichten haben im Neuzustand eine raue Oberfläche. Während der ersten 10 Bohrungen erfolgt eine deutliche Glättung. Dies führt zu einer Durchmesserverringeringung wie in Abbildung 4 ersichtlich. Zusätzlich resultiert aus der Glättung der Diamantschicht eine geringere Oberflächenrauheit im Bohrkanaal, siehe Abbildung 8 sowie eine Reduktion der Austrittsdelaminationen. Diamantbeschichtete Bohrer werden daher häufig über etwa 10 Bohrungen „eingefahren“. Der Kugelkopfräser zeigt eine deutliche Reduktion der Bohrungsdurchmesser und erreicht damit IT9. Die raue Diamantschicht zu Beginn erzeugt eine unruhige Bewegung in der Bohrung zu Beginn, mit dem Einfahren der Beschichtung rattert das Werkzeug weniger in der Bohrung. Ab Bohrung 400 werden die einzelnen Schneiden aufgrund des Verschleißes zunehmend stumpf, die Ratterneigung des Werkzeugs steigt erneut. Die Oberflächenrauheit des Bohrkanaals, siehe Abbildung 8, kann einen Einfluss auf die gemessenen Durchmesser haben. Da die Rauheit der Bohrkanaäle im geringen einstelligen Mikrometerbereich liegt, kann der Einfluss vernachlässigt werden.

In nachfolgender Abbildung 5 ist der Bohrkanaal des Werkzeugs HA2 für die Bohrungen 2, 402 und 1002 dargestellt. In Bohrung 2 sind die durch den Bohrer eingebrachten Vorschubstufen zu erkennen. Diese verschwinden weitestgehend über die ersten 10 Bohrungen. Bohrung 402 zeigt einen Bohrkanaal von hoher Oberflächengüte, Bohrung 1003 zeigt eine sehr schlechte Oberflächengüte. Insbesondere sind hellere, aufgeraute Stellen erkennbar. Diese raue Oberfläche ergibt sich aus dem Sägezahnprofil, welches üblicherweise für die Faserorientierungen  $120^\circ < \Theta < 170^\circ$  ergibt, siehe Rummenhölter [9] sowie Abbildungen 9 und 10. Am Bohrungsaustritt sind die Fasern in unmittelbarer Nähe des Bohrkanaals gegenüber den weiter entfernten Fasern angehoben. Es liegt Austrittsdelamination vor.



**Abbildung 5:** Analyse des Bohrkanaals Werkzeug HA2 mittels Auflichtmikroskop



**Abbildung 6:** Analyse des Bohrkanaals Werkzeug Pa5 mittels Auflichtmikroskop

Abbildung 6 zeigt den Bohrkanaal von Werkzeug Pa5 nach Bohrung 2, 402 und 1003. Bohrung 2 zeigt äquivalent zu Werkzeug HA2 Bereiche erhöhter Rauheit. Diese liegen, wie in Abbildung 9 und 10 ersichtlich, im Bereich der Faserorientierungen von  $120^\circ < \Theta < 170^\circ$ . Das Werkzeug zeigt die Vorschubstufen allerdings in geringerem Umfang. Bohrung 402 ist von sehr guter Oberflächenqualität. Die Oberflächenbereiche mit Sägezahnprofil sind deutlich reduziert. Bohrung 1003 zeigt ebenfalls eine schädigungsarme Oberfläche des Bohrkanaals. Lediglich im Bereich des Bohrertritts ist eine deutliche Schädigung erkennbar.

Der Bohrkanaal des Kugelkopfräasers ist in Abbildung 7 dargestellt. Zahlreiche Bohrungen weisen deutliche Rattermarken entlang der Nebenschneide auf. Ursächlich hierfür ist die schneidende Führungsfase eines Kugelkopfräasers. Der Kugelkopfräser wird demzufolge nur unzureichend in der Bohrung geführt, eine Bohrbearbeitung ist nur auf sehr steifen Führungssystemen wie einer Werkzeugmaschine möglich. Die Oberfläche von Bohrung 2 erscheint matt. Bohrung 402 zeigt eine glänzendere Oberfläche mit Rattermarken. Die Oberfläche ist demzufolge mikroskopisch glatter. Dies könnte von der Glättung der Diamantschicht herrühren. Bohrung 736 zeigt eine etwas mattere Oberfläche als Bohrung 402, aber in etwa gleichstark ausgeprägte Rattermarken. Der Bohrungsaustritt der Bohrung 736 zeigt keine intensiveren Schäden als die übrige Bohrungswand. Somit zeigt der Kugelkopfräser im Gegensatz zu den Spiralbohrern keine Korrelation zwischen Vorschubkraft und Austrittsdelamination. Sägezahnstrukturen für die Bereiche der Faserorientierungen von  $120^\circ < \Theta < 170^\circ$  sind am deutlichsten für Bohrung 736 auszumachen. Diese sind insgesamt aber weniger stark ausgeprägt verglichen mit den Spiralbohrern. Die deutlich unterschiedliche Prozessführung des Kugelkopfräasers lässt nicht nur die Oberfläche markant anders aussehen als jene von Spiralbohrern sondern wirkt sich auch auf die Entwicklung des Bohrungsdurchmessers aus, siehe Abbildung 4.

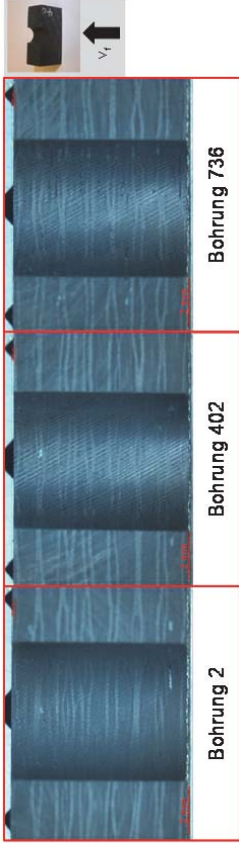


Abbildung 7: Analyse des Bohrkanals Werkzeug C02 mittels Auflichtmikroskop

Abbildung 8 stellt die Oberflächenrauheit der einzelnen Bohrkanäle dar. Die Rauheit der Bohrkanäle aller Spiralbohrer, Pa5, HA2 und D10, sinkt von Bohrung 2 zu Bohrung 150. Grund hierfür ist die bereits erwähnte Glättung der Diamantbeschichtung. Pa5 zeigt eine Rauheit von  $R_a = 1,47 \mu\text{m}$  für Bohrung 1, die auf eine minimale Rauheit von  $R_a = 0,41 \mu\text{m}$  für Bohrung 250 absinkt. Hiernach steigt die Rauheit wieder an mit einem Wert von  $R_a = 0,66 \mu\text{m}$  für Bohrung 1000.

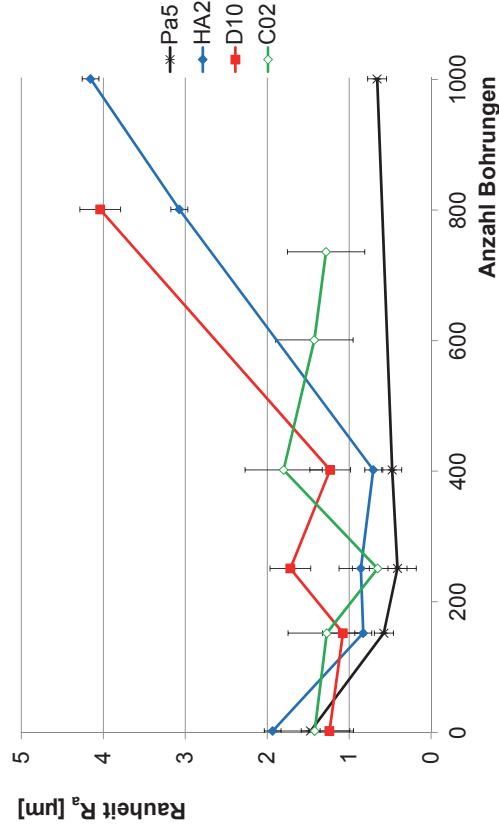


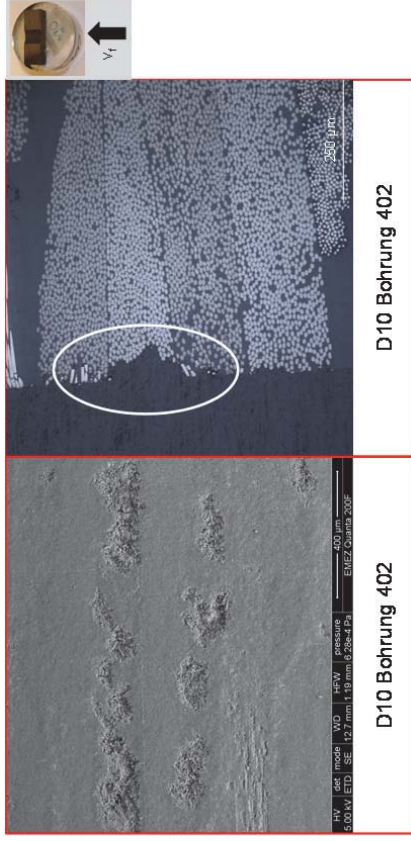
Abbildung 8: Oberflächenrauheit der Bohrkanäle

Werkzeug HA2 fertigt die erste Bohrung mit einer Rauheit  $R_a = 1,93 \mu\text{m}$ . Dieser Wert sinkt auf minimal  $R_a = 0,71 \mu\text{m}$  für Bohrung 400 und steigt danach

verschleißbedingt wieder an. Der Anstieg der Rauheit korreliert sehr gut mit dem starken Anstieg der Vorschubkraft ab Bohrung 400. Werkzeug D10 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie Werkzeug HA2, allerdings setzt der Verschleiß deutlich früher ein. Werkzeug D10 und HA2 zeigen eine erhöhte Rauheit für Messpunkt Bohrung 250 verglichen mit den benachbarten Messpunkten 150 und 400. Die Analyse des Bohrkanals in den Abbildungen 5 und 6 zeigt eine deutlich höhere Rauheit für die Faserorientierungen  $120^\circ < \Theta < 170^\circ$ . Sollte die Messstrecke in beiden Fällen in größerem Umfang diese Faserorientierungen eingeschlossen haben, so resultiert hieraus ein höherer  $R_a$ -Wert. Das vorliegende Material besitzt einen quasiisotropen Aufbau. Insbesondere bei Wahl eines unidirektionalen Materials mit einer deutlichen Vorzugsrichtung im Aufbau vermindert sich die Aussagekraft einer Rauheitsmessung entsprechend DIN EN ISO 4288 deutlich. Der Kugelmesskopf C02 zeigt einen sehr unregelmäßigen Verlauf: Bohrung 1 besitzt eine Oberflächenrauheit von  $R_a = 1,42 \mu\text{m}$ , Bohrung 250 weist  $R_a = 0,65 \mu\text{m}$  auf, Bohrung 400 wiederum  $R_a = 1,80 \mu\text{m}$  und Bohrung 736  $R_a = 1,28 \mu\text{m}$ . Die Überlagerung unterschiedlicher Effekte führt zu diesem uneinheitlichen Ergebnis. Eine genaue Bestimmung der Einflussfaktoren ist aufgrund der vorhandenen Daten nicht möglich, sicherlich beeinflussen die variierende Schneidenschärfe auf der Nebenschneide sowie die Glättung der Diamantschicht die Ratterneigung.

### 3.2 Analyse mittels REM und Schliffbildern

Abbildung 9 zeigt die Analyse des Bohrkannels von Probe D10 Bohrung 402. Die REM-Aufnahme zeigt größtenteils eine zugeschnittene Oberfläche, auf der weder Fasern noch deren Orientierung erkennbar sind. Bei den Faserorientierungen  $\Theta = 5-10^\circ$  sind die Faserenden zu erkennen, bei einer Faserorientierung von  $\Theta \approx 150^\circ$  tritt die typische Sägezahnfigur auf. Auf dem Schliffbild parallel zur Vorschubrichtung ist ebenfalls der Durchmesserersatz aufgrund eines Sägezahns festzustellen. In den Lagen oberhalb und unterhalb sind Faserausbrüche zu erkennen, resultierend aus der mangelnden Stützwirkung der ausgebrochenen Fasern im Sägezahn.



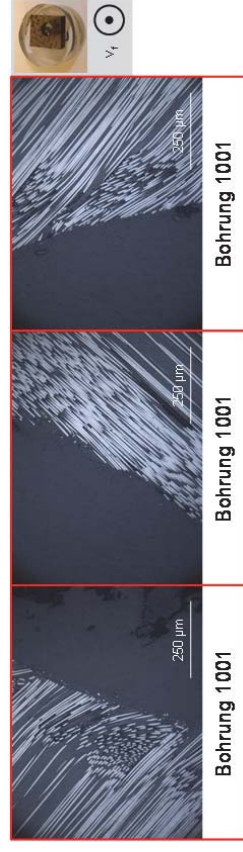
**Abbildung 9:** D10 Bohrung 402; REM-Aufnahme Bohrkanaal und Schlibbild in Vorschubrichtung

Ohne zusätzliche Angaben sind diesem Schlibbild keine Faserorientierungen zu entnehmen. Einzig Fasern mit einer Orientierung von  $90^\circ$  zur Betrachtungsebene erscheinen im Anschliff als runder Kreis, jene mit einer Orientierung von  $0^\circ$  als Linie. Alle übrigen Faserorientierungen ergeben im Anschliff eine elliptische Form. Delaminationen sind in Umfang und Rissgröße in der Schlibfebene gut zu erkennen. Allerdings sind Delaminationen von Bohrungen nicht gleichmäßig auf dem Umfang verteilt, so dass Rückschlüsse auf den gesamten Umfang der Delamination anhand dieser Art Schlibbilder nicht möglich sind. Aussagekräftige Aufnahmen und Analysen sind mit beiden Methoden erst in einem Verschleißstadium zu erreichen, in dem die Bohrung bereits mit bloßem Auge als Ausschuss zu identifizieren ist. Schlibbilder orthogonal zur Vorschubrichtung erlauben die Analyse einer einzigen Faserlage. Soll der Bohrungsaustritt analysiert werden, so ist eine der 3 letzten Faserlagen anzuschleifen, siehe Abbildung 13. Die beiden nachfolgenden Analysen betrachten jeweils die 5. Faserlage und somit den Bohrkanaal ohne Austrittseffekte. Beide Analysen werden perspektivisch vom Austritt her durchgeführt, dies ergibt eine Rotation des Bohrwerkzeugs in mathematisch positiver Richtung. Abbildung 10 zeigt Bohrung 601 von Werkzeug Pa5. Bei einer Faserorientierung  $\Theta \approx 90^\circ$ , linkes Bild, sind die Fasern knapp unter der Oberfläche gebrochen. Die Faserorientierung  $\Theta \approx 20^\circ$ , mittleres Bild, zeigt eine bruchfreie Durchtrennung. Die Faserorientierung  $\Theta \approx 150^\circ$ , rechtes Bild, zeigt eine Sägezahnstruktur der Oberfläche. Die Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit den Resultaten aus orthogonalen Schnittversuchen.



**Abbildung 10:** Pa5 Bohrung 601; Schlibbild orthogonal zur Vorschubrichtung

Abbildung 11 zeigt die Analyse des Schlibbildes Werkzeug HA2, Bohrung 1001 orthogonal zur Vorschubrichtung. Die Bohrung ist aufgrund des starken Verschleißes am Werkzeug von sehr schlechter Qualität, siehe Abbildung 5, die Bohrung wird mit einer sehr hohen Vorschubkraft eingebracht, siehe Abbildung 3. Die Faserorientierung  $\Theta \approx 90^\circ$ , linkes Bild, zeigt eine deutliche Verdrängung der Fasern unterhalb der Oberfläche, anstelle der typischen unterhalb der Oberfläche gebrochenen Fasern. Für  $\Theta \approx 165^\circ$ , mittleres Bild, ergibt sich eine sägezahnartige Oberfläche, ein zusätzliches Brechen der Fasern ist nicht zu erkennen. Die Faserorientierung  $\Theta \approx 30^\circ$  zeigt ebenfalls eine deutliche Verdrängung der Fasern. Die hohen Prozesskräfte sind ursächlich für die Verdrängung der Fasern. Der Materialverbund ist nicht mehr in der ursprünglichen Form gegeben, das Material ist vermutlich in der Festigkeit herabgesetzt.



**Abbildung 11:** HA2 Bohrung 1001; Schlibbild orthogonal zur Vorschubrichtung

### 3.3 Analyse der Eindringprüfung

In der Metallbearbeitung kann mittels der Methode der Eindringprüfung die Existenz eines Risses im Grundmaterial nachgewiesen werden [6]. Abbildung 12 zeigt die

Analyse der Eindringprüfung für Werkzeug D11 Bohrung 803. Der Farbstoff kann auf nahezu jeder Fläche mit Zerspanbedingung  $120^\circ < \Theta < 170^\circ$  nachgewiesen werden. Eine Rissidentifikation ist damit nicht möglich. Die Methode ist für die Analyse der Zerspanungsqualität von CFK ungeeignet.

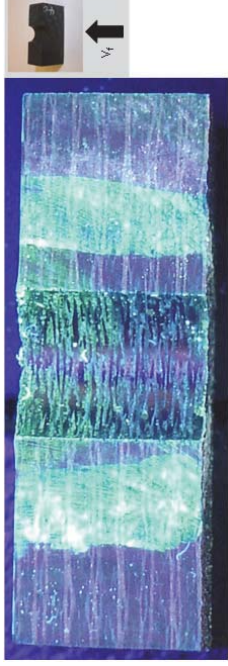


Abbildung 12: Eindringprüfung für Werkzeug D11 Bohrung 803

### 3.4 Analyse der Bohrung im Beugungs-CT

Die Verwendung eines Beugungs-CT ermöglicht eine Kontrastbildung zwischen Faser und Matrix. Insbesondere Risse im Material werden unabhängig von ihrer Ausdehnung als weiße Stellen ausgegeben. Abbildung 13 zeigt die 3 letzten Lagen vor dem Werkzeugaustritt von Werkzeug D10, Bohrung 803. Die Bohrung ist stark geschädigt und daher für eine aussagekräftige Analyse besonders geeignet. Die letzte Lage, Schicht 1, links, zeigt deutliche Delaminationen insbesondere im Bereich der Eingriffsbedingung  $\Theta \approx 90^\circ$ . Die Schädigungen reichen etwa 3-4 mm über den Bohrungsrand hinaus. Schicht 2 zeigt insbesondere Schädigungen im Bereich der Eingriffsbedingung  $\Theta \approx 30^\circ/150^\circ$ , die Schädigung reichen 2-3 mm in das Grundmaterial. Schicht 3 zeigt eine einzelne Schädigung unterhalb einer deutlichen Schädigung von Schicht 2, markiert mit weißem Kreis. Die Schädigung reicht 1,5 mm in das Grundmaterial. Die übrigen 25 Lagen weisen keine Delaminationschäden auf. Demzufolge sind 3 Lagen CFK aufgrund des Bohrungsaustritts geschädigt.



Abbildung 13: Ergebnisse Beugungssträngen, Probe D10 Bohrung 803

## 4 Zusammenfassung und Diskussion

Die Studie gibt einen umfassenden Einblick in die mögliche Dokumentation der Materialqualität von CFK nach einer Bohrbearbeitung. Die Vermessung der Durchmessertoleranz mit der Koordinatenmessmaschine zeigt gute Ergebnisse. Eine Messung der Oberflächenrauheit entsprechend DIN EN ISO 4288 als Linienkontakt zeigt nur eine sehr limitierte Aussagekraft. Der Einsatz von CFK macht insbesondere dann Sinn, wenn es eine bevorzugte Richtung der Kraffteinleitung gibt. Insbesondere für diese stark anisotropen Aufbauten, für die häufig unidirektionales Material verwendet wird, variiert die Oberflächenrauheit je nach Messpunkt deutlich. Eine flächige Messung über den Umfang würde alle Faserlagen abbilden. Eine Normierung für eine solche Messung existiert zum jetzigen Zeitpunkt nicht.

Schliffbilder in der Orientierung orthogonal zur Vorschubrichtung zeigen deutlich aussagekräftigere Ergebnisse als jene entlang der Vorschubrichtung. Mittels eines solchen Schliffbildes können die durch ein Werkzeug eingebrachten Schädigungen präzise analysiert werden. Es bleibt darauf zu achten, dass mindestens 3 Lagen abgeschliffen werden, um die Schädigungen im Bohrkanaal und nicht im Austritt abzubilden. Schliffbilder bleiben jeweils auf eine Faserlage beschränkt, wenngleich eine einzelne Faserlage sicherlich eine hohe Aussagekraft für die übrigen Lagen hat. Die Erstellung von Schliffbildern lässt sich nur unzureichend automatisieren und ist zudem sehr aufwendig. Eine industrielle Anwendung scheidet daher aus. Das Rasterelektronenmikroskop zeigt die zerspannte Oberfläche in hohem Detailgrad. Bohrer mit geringem Verschleiß zeigen entweder eine zugeschmierte Oberfläche oder eine Sägezahnstruktur für Faserorientierungen  $120^\circ < \Theta < 180^\circ$ . Deutliche Schäden an den Fasern, das Verdrängen der unterschiedlichen Schichten sowie Austrittsdelaminationen sind erst für stark verschlissene Werkzeuge sichtbar.



In diesen Fällen sind die Schäden bereits derart umfangreich, dass die Bohrungen aufgrund Durchmesseränderung sowie der Austrittsdelamination Ausschuss sind. Eine Nutzung der Technologie ist damit für die Qualitätssicherung uninteressant. Die Eindringprüfung zeigt ein diffuses Bild vieler unterschiedlicher Risse und Stellen der Farbeindringung. Die Aussagekraft der Analyse ist unzureichend. Das Beugungs-CT aus dem Haus CSEM ermöglicht als bisher einziges Analyse-Instrument die vollständige dreidimensionale Analyse einer Bohrung in CFK. Zusätzlich ist die Methode zerstörungsfrei. Es kann nachgewiesen werden, dass Austrittsdelaminationen bis in die 3. Faserlage auftreten. Die Analysemethode ist damit von herausragender Leistungsfähigkeit, aufgrund der hohen Kosten allerdings nur für punktuelle Kontrollen im Bereich etwa der Werkzeug- oder Prozessqualifikation geeignet. Abschließend bleibt zu ermitteln, inwieweit die identifizierten Schäden die Bauteilfestigkeit herabsetzen.

## 5 Danksagung

Die Autoren danken der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) sowie den Unternehmen CSEM SA, RUAG Schweiz AG, Heule Werkzeug AG, Dixi Polytools SA sowie Oerlikon Balzers Coating AG für die Unterstützung.

## Literaturangaben

- [1] Rentsch, R., Brinksmeier, E.; Pecat, O.: *Surface Integrity of Machined CFRP Structures*. In: *Proceedings of the ECCM15-15th European Conference on Composite Materials*, Venedig, Italien. 2012
- [2] Hopmann, C., Bastian, R., Karatzias, C., Greb, C., Ozolin, B.: *Faserverstärkte Kunststoffe Tauglich für die Grossserie*. ATZ - *Automobiltechnische Zeitschrift*, 2013, 115, 262-266
- [3] Faraz, A.; Biermann, D.; Weinert, K.: *Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates*. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, 49, 1185-1196
- [4] Tsao CC; Hocheng H.: *Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials*. *International journal of mechanical sciences*, 2007, 49/8, 983-988

- [5] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. Springer DE, 2008
- [6] Schuhmann, H.; Oettel H.: *Metallografie*. 14 Aufl., Weinheim: Wiley-VCH, 2004
- [7] Armitagea, P.R.; Wright, C.D.: *Design, development and testing of multi-functional non-linear ultrasonic instrumentation for the detection of defects and damage in CFRP materials and structures*. *Composites Science and Technology*, 2013, 87, 149–156
- [8] Bo Yang, B.; Huang, Y.; Cheng, L.: *Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites*. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60, 166–173
- [9] Rummenhöller S.: *Werkstofforientierte Prozessauslegung für das Fräsen von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen*. Shaker Verlag; Aachen, 1996