Leichtbau, Fertigungstechnik, Produktionstechnik

Bohrfolien erhöhen Bearbeitungsqualität*

Funktionale Bohrfolien verbessern die Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen

D. Becker, M. Schneider, P. Esch

Dr.-Ing. Dina Becker
Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart
Holzgartenstr. 17, D-70174 Stuttgart
Tel. +49 (0)711 / 685-83875, Fax +49 (0)711 / 685-70040
E-Mail: dina.becker@ifw.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Marco Schneider; Dipl.-Ing. Philipp Esch
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Holzgartenstr. 17, D-70174 Stuttgart
Tel. +49 (0)711 / 970-1535 oder -1557, Fax +49 (0)711 / 9705-717 1535 oder -1557
E-Mail: marco.schneider@ipa.fraunhofer.de oder philipp.esch@ipa.fraunhofer.de

Zur Steigerung der Bearbeitungsqualität bei der Bohrbearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen, wurden funktionale Bohrhilfsfolien untersucht und bewertet. Die Bohrfolien decken den Bohrungseintritt und -austritt ab. Diese mechanische Abstützung bewirkt, dass typische Schadensphänomene wie beispielsweise Delaminationen und Ausfransungen reduziert werden.

Application of supportive foils in drilling fibre reinforced plastics – functional supportive foils increase machining quality in drilling fibre reinforced plastics

Functional foils are investigated in drilling fibre reinforced plastics. In order to increase performance and machining quality, supportive foils are applied on the entry and exit side of a drilling specimen. By mechanical support of the foils, typical damage phenomena are reduced and quality output is increased.

1 Einleitung und Motivation

Verbundwerkstoffe aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) rücken zunehmend in den Fokus der Automobilindustrie. Die Gewichtsreduzierung durch den Einsatz von leichten Faserverbundwerkstoffen bei gleichbleibender Festigkeit im Vergleich zur konventionellen Bauweise macht diese Werkstoffe den herkömmlichen überlegen. Insbesondere vor dem Hintergrund der Effizienzsteigerung und Ausstoßreduzierung nimmt der werkstoffliche und strukturelle Leichtbau eine zentrale Rolle ein. Neben der Automobilindustrie liegen weitere Branchen für den Einsatz der faserverstärkten Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrtindustrie, Medizintechnik sowie dem Bauwesen.

Die Herstellungsverfahren erlauben eine meist nur endkonturnahe Fertigung der Bauteile, wodurch eine Endbearbeitung notwendig wird. Insbesondere die Herstellung von Funktionsflächen oder Bohrungen für Fügeanbindungen sind nachträglich umzusetzen. Dabei wird die Qualität dieser Nachbearbeitungsschritte maßgeblich durch das Werkzeug bestimmt. Die hohe Abrasivität der Fasern, insbesondere von Kohlenstofffasern, welche in Faserlängsrichtung diamantähnliche Strukturbindungen aufweisen, erhöht den Werkzeugverschleiß und führt dadurch zu einer limitierten Standzeit der Werkzeuge, meist einhergehend mit Einschränkungen bei der Bearbeitungsqualität.

Verschleißbedingte Probleme wie Delamination und Ausfransungen sind dabei die häufigsten Bearbeitungsfehler beim Bohren von FVK-Werkstoffen [1]. Zu den irreversiblen und damit besonders kritischen Fehlern zählt die Delamination, welche durch Ausbildung eines interlaminaren Spalts die Werkstoffstruktur signifikant abschwächen kann [2]. Für die Entstehung eines Grates sind im Wesentlichen die Werkzeuggeometrie und die Prozessparameter maßgeblich. Ausfransungen an den Bohrungsrändern treten überwiegend im Bereich der Decklagen auf, weil sich die Faserstränge nicht auf die darunterliegen Schichten abstützen können.

Damit bei der FVK-Bearbeitung die Bearbeitungsqualität und Standzeit der Werkzeuge gleichzeitig gesteigert werden kann, werden Bohrer aus Hartmetallen HM (beschichtet/unbeschichtet), polykristallinem Diamant PKD, monokristallinem Diamant MKD und beschichtete Werkstoffe verwendet. Die

unterschiedlichen Schneidstofftypen bei den Bohrwerkzeugen bringen allerdings auch Nachteile mit sich. Bei den MKD- und PKD-Werkzeugen sind sehr hohe Werkstoff- und Herstellkosten zu amortisieren [9]. Beschichtete Werkzeuge erfordern komplexe PVD- und CVD-Beschichtungsverfahren. Einen hohen Verschleiß bringen unbeschichtete HM-Werkzeuge mit sich. Bei den beschichteten Werkzeugen besteht zudem die Gefahr, dass durch mögliche abrupte Schichtabplatzungen am Bohrwerkzeug die Verschleißmarkenbreite stark ansteigt.

Werden beim FVK-Bohren Schmierstoffe eingesetzt, kann sich dies positiv auf die Vermeidung von Ausfransungen auswirken [6]. Allerdings zirkulieren im Schmierfilm abgetrennte Faserpartikel, die mittels üblicher Schmierstofffilter nicht abgeschieden werden können und ihrerseits abrasiv auf das Werkzeug wirken. Damit erhöht der zugeführte Schmierstoff den Anteil an abrasiven Faserbruchstücken in der Bearbeitungszone und beschleunigt somit durch Mehrfachzerspanung der Faserbruchstücke den Werkzeugverschleiß. Zudem ist eine nachträgliche Reinigung der Bauteile von Schmierstoffen aufwendig und teuer. Die Wirkung von wässrigen Lösungen im Hinblick auf die Hydrolyse-Beständigkeit der Kunststoffe ist zudem noch unzureichend bewertet.

Qualitativ hochwertige Bohrungen in FVK-Bauteilen erfordern eine aufwendige und kostspielige Optimierung der einzelnen Prozessparameter. Eine derartige Parameterstudie ist in der Massenfertigung wirtschaftlich, jedoch nicht bei der Reparatur von einzelnen Bauteilen und kleinen Aufträgen mit geringer Stückzahl. Die Prozesssicherheit bei kleinen Serien und einzelnen Reparaturen muss gerade mit Blick auf die hohen Kosten der Werkstoffe unbedingt gewährleistet sein.

An dieser Stelle besteht somit Forschungsbedarf. Es muss ein Verfahren entwickelt werden, welches die Prozesssicherheit bezüglich der Bauteilqualität bei jedem Bohrvorgang von FVK-Bauteilen sicherstellt. In einer Studie des IfW der Universität Stuttgart wurde getestet, ob die Bearbeitungsqualität beim Bohren mit HM-Werkzeugen durch Anwendung von Polymerfolien gesteigert werden kann. Das Potenzial dieses Ansatzes wurde dabei an zwei Bearbeitungsverfahren, der maschinellen CNC und der manuellen Bearbeitung, untersucht. Da in der Praxis zumeist Handbohrmaschinen mit einer geregelten Bohrvorschubeinheit eingesetzt werden, fanden diese Versuche an einer Ständerbohrmaschine mit einstellbarem Vorschub statt.

2. Werkstoffe und Werkzeuge

In den Untersuchungen wurden zwei Typen von kohlenstofffaserverstärkten Kunstoffen (CFK) untersucht:

a.) CFK mit unidirektionalem Gelege (CFK-UD): acht Fasergelege, Faserausrichtung: 0° und 90°, Faseranteil 67%, Fasertyp: Polyacrylnitril (PAN), Matrix: Epoxidharz
b.) CFK mit Gewebeaufbau: Gewebekörper 2/2, Faseranteil 62% ± 2%, Fasertyp: PAN, Matrix: Epoxidharz

Als Werkzeuge wurden Hartmetallbohrer (HM) Ø = 6 mm verwendet. Diese Größe repräsentiert eine gängige Dimension für die CFK Bearbeitung im Handbetrieb. Der Schneidstoff ist durch seine hohe Härte und gleichzeitiger Unempfindlichkeit in der Handhabung im Vergleich zu PKD Werkzeugen für die manuelle Bearbeitung geeignet und häufig verwendet (**Bild 1**)

Als Polymerfolien wurden Klebefolien aus verschiedenem Trägermaterial untersucht. Die technischen Spezifikationen sind **Tabelle 1** zu entnehmen.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 CNC-Bohren von gewebten CFK-Laminaten

Die Untersuchungen wurden zum einen vollständig automatisiert an einem HSC-Bearbeitungszentrum der Firma Ex-Cello Maschinentyp XHC241 und zum anderen an einer manuellen Ständerbohrmaschine durchgeführt. Für die Bearbeitung wurden entsprechend ausgewählte Werkzeuge eingesetzt (Bild 1). Die Prozessparameter für die unterschiedlichen Bearbeitungssituationen sind nachfolgend darstellt. Die Bearbeitung fand in beiden Fällen trocken statt. Da häufig manuelle oder semi-automatisierte Bearbeitungsverfahren Einsatz finden, sollte die Eignung der Bohrfolien für diese beiden Verfahren geprüft werden (**Tabelle 2**).

Vorbereitend zu den experimentellen Versuchen wurden die Platten gründlich gereinigt und mit den Folien beklebt. Die Versuchsplatten für das Bearbeitungszentrum wurden in einer eigens konstruierten Spannvorrichtung aus Aluminium fixiert, welche die Proben optimal einspannt und Schwingungen oder lastbedingte Durchbiegungen während des Bohrvorgangs minimiert (**Bild 2**). Der Aufbau der Spannvorrichtung ist zweigeteilt. Die untere Platte wird in die Spannaufnahme des Bearbeitungszentrums gespannt. Die obere Platte wird mit der unteren Platte verschraubt und mit Passstiften exakt positioniert.

Die reale Einspannsituation gibt **Bild 3** exemplarisch wieder. In jedem Nutabschnitt wurden acht Bohrungen gesetzt. Die Abstände unter den Bohrungen sowie zu den Bohrkulissen selbst waren so gewählt, dass mögliche Abstützungseffekte ausgeschlossen werden konnten.

Um eine möglichst ganzheitliche Aussage hinsichtlich der Wirkung der Folien auf die Zerspanung zu erhalten, wurden wesentliche Qualitätsmerkmale untersucht und quantitativ bestimmt. Die Qualitätsmerkmale Kantenausbruch, Gratbildung und Delamination waren dabei relevant.

Mittels Lasertriangulationsverfahren wurde der Kantenausbruch für jede Bohrung mit Folie und Referenzbohrung ohne Folie ermittelt. Das Ergebnis war, dass die Folien keinen wirksamen Einfluss auf das Kantenausbruchverhalten des Werkstoffes haben. Gleiches konnte in Bezug auf die gemessene Gratbildung festgestellt werden. Aufgrund der duroplastischen Matrix, welche keine thermisch verursachten plastischen Verformungen erlaubt, entstanden am Bohrungsrand keine Aufwerfungen. Der Einsatz von Folien hat somit im Hinblick auf Kantenausbrüche und Gratbildung entgegen der Erwartung keine positive Wirkung.

Zur Beurteilung von Delamination an der Eintrittsseite der Bohrungen wurde ein Auflichtmikroskop der Firma Keyence vom Typ VHX 600 verwendet. Die Eintrittsseite einer Bohrung in FVK ist als besonders kritisch zu sehen, da hierbei die dem Bohrwerkzeug eigene Wendelung eine der Vorschubrichtung entgegengesetzte Kraftkomponente aufbaut, welche die Faserschichten voneinander abschälen kann. Dieses Phänomen ist bekannt unter dem Begriff der „Peel-Up“-Delamination [5].

Über die integrierte Auswertesoftware des Keyence Mikroskops konnte jeweils der Bohrmittelpunkt durch drei Punkte am Bohrungsrand bestimmt werden. Die maximale Delamination wurde über den Abstand zum Bohrmittelpunkt bestimmt. Zur Bestimmung des Delaminationsfaktors wurden auf jeder Versuchsplatte jeweils acht Bohrungen stichprobenartig vermessen. Dazu wird der Bohrungsdurchmesser und die Bohrungsmitte mit drei Punkten eindeutig definiert und von dort aus die Stelle maximaler Delamination erfasst. Der Delaminationsfaktor nach [7, 8] ergibt sich folgendermaßen:

<**Formel 1**>

Im Vergleich zur Referenzbohrung ohne Bohrfolie reduziert der Einsatz von Folien den Delaminationsfaktor, wie in **Bild 4** erkennbar. Während bei den Bohrungen ohne Folie ein Delaminationsfaktor im Mittel von 1,72 errechnet wurde, liegt er bei allen untersuchten Bohrungen mit Folien unter 1,32. Prozentual lässt sich also eine Verbesserung um etwa 51% erzielen. Betrachtet man die eingetragene Gesamtstreubreite der einzelnen gemessenen Bohrungen genauer, fällt auf, dass die kleinsten Streuungen bei den Bohrungen mit Folien erzielt wurden. Somit ergibt sich eine höhere Reproduzierbarkeit dieser Ergebnisse im Vergleich zu der Bearbeitung ohne Folierung.

Die statistische Signifikanz des Einflusses der funktionalen Folien auf die Reduzierung der Delamination ist für alle Folientypen gegeben. Exemplarisch ist eine einfache Varianzanalyse für den Faktoreinfluss Folie am Beispiel der Polyethylenfolie nachfolgend dargestellt (**Tabelle 3**)

Bei einem tolerierten Alpha-Fehler von 5% und einem P-Wert von 0,004 ergibt sich somit ein signifikanter Effekt des Faktors Folie. Die deutliche Unterschreitung des Alpha-Wertes bestätigt die statistische Signifikanz des Faktors Folierung für die Reduzierung der Delamination auf der Bohrungseintrittsseite und bei maschineller Bearbeitung. Die deutliche Unterschreitung des kritischen F-Wertes zur Prüfgröße (F) zeigt ebenfalls, dass die Nullhypothese über die Annahme gleicher Mittelwerte verworfen werden kann.

Auf **Bild 5** ist die Bohrqualität unter Verwendung einer PTFE-Folie dargestellt. Nach Entfernen der Bohrfolie sind lediglich minimale Delaminationserscheinungen um den Bohrungseintrittsrand zu erkennen. Erklärend kann angenommen werden, dass die Folie den Werkstoff in seiner Decklage stützt und diesen Freiheitsgrad einschränkt. Bei der Bearbeitung ohne Folie bleibt der Werkstoff ungestützt und der Bohrvorschubrichtung entgegengesetzte Kräfte können – insbesondere verursacht durch den Werkzeugdrall – das Abplatzen der laminaren Schichten bedingen.

3.2 Manuelles Bohren von unidirektional gelegtem CFK

Um die Wirkung der Folien zu bewerten, wurden neben der CNC-Bearbeitung auch Versuche an einer Ständerbohrmaschine durchgeführt. Diese sollen klären, ob Bohrfolien auch für die im industriellen Bereich so häufig eingesetzten manuellen Anwendungen geeignet sind. Die Bohrbearbeitung erfolgt dabei unter Zuhilfenahme von Bohrvorschubeinheiten, weshalb für den Untersuchungsrahmen eine Ständerbohrmaschine mit geregeltem Vorschub zur Nachstellung dieses Prozesses verwendet wurde.

Die Auswertung der manuell durchgeführten Versuche beschränkt sich auf die Bewertung der Ausfransungs- und Delaminationserscheinungen. Die Errechnung des Ausfransungsfaktors gelang mittels eines LabVIEW-Algorithmus, welcher über Bildbinarisierung die der Bauteilkante überstehenden Anteile als Ausfransungen identifiziert und quantifiziert. Der Faktor beschreibt die durch Fasern verdeckte Bohrungsfläche.

<**Formel 2**>

Ein Faktor größer 0 bedeutet daher, dass Fasern in die Bohrung hereinragen. Die Auswertung bezieht sich immer auf die Austrittsseite der Bohrung, da auf der Eintrittsseite keine signifikanten

Ausfransungserscheinungen auftraten. Die Ergebnisse sind in **Bild 6** dargestellt:

Bei den Bohrungen ohne Bohrfolien wurde eine mittlere Ausfransung von 33,5% an der Austrittsseite der Proben gemessen. Die besten Ergebnisse wurden mit dem PTFE-Glasgewebe und der PTFE-Folie erzielt mit mittleren Ausfransungen kleiner 10%. Eine Varianzanalyse zeigt, dass im Hinblick auf die Reduzierung der Ausfransungserscheinungen bei einem tolerierten Alpha-Fehler von 5% ein statistisch nachweislich signifikanter Effekt vorliegt (**Tabelle 4**).

Die Delaminationserscheinungen sind in nachstehendem Diagramm (**Bild 7**) wiedergegeben. Ähnlich wie bei der Bearbeitung auf dem BAZ erweisen sich die Folierungen auch hier als vorteilhaft, jedoch sind die Unterschiede in den Mittelwerten nicht mehr so deutlich. Dies liegt zum einen daran, dass der Prozess unter für CFK ungünstig langsamen Bedingungen durchgeführt wurde, da die Standbohrmaschine keine höheren Schnittparameterwerte zur Prozessnachstellung von Handbohrmaschinen zugelassen hat. Zum anderen wurde auch eine einfachere Werkzeuggeometrie gewählt, welche einen steileren (kleineren) und damit aggressiveren Spiralwinkel aufweist.

Aufgrund des großen Streubereiches und der nur geringen messbaren Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen konnte für die manuelle Bearbeitung im Hinblick auf eine Reduzierung der Delamination kein signifikanter Effekt festgestellt werden. Lediglich die Streuung, dargestellt durch die Standardabweichung der Messwerte, konnte mit dem Einsatz der Folie reduziert werden. Aufgrund der Lage des Delaminationsgrades der Gruppen mit Folie innerhalb der Streubreite der Referenzbohrung ohne Folie kann keine Signifikanz des Faktors Folie abgeleitet werden.

Nachstehend werden die Ausprägungen der Delamination mit unterschiedlichen Folierungen dargestellt. Das manuelle Bohren wies an der Bohreraustrittsseite starke Delaminationserscheinungen auf. Die spitze Werkzeuggeometrie verursachte hingegen an der Eintrittsseite nur sehr geringe Delamination. Aufgrund dieser Gegebenheit wurde die Bohrungsaustrittsseite untersucht und die funktionalen Folien hinsichtlich der Fähigkeit zur Schadensreduzierung daran bewertet (**Tabelle 5**).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung von funktionalen Bohrfolien die Bearbeitung von CFK verbessern kann. Insbesondere die Bearbeitung am BAZ profitiert von diesem Ansatz. Das besonders kritische Schadensphänomen der Delamination konnte dabei signifikant reduziert werden und die spezifischen Auslegungen des Bohrwerkzeuges zur schadensfreien Bearbeitung ergänzen.

Die Bearbeitung an der manuellen Ständerbohrmaschine zeigt hingegen einen nur sehr marginalen Effekt der Reduzierung der Delamination. Zum einen kann dies durch die maschinellen Gegebenheiten reduzierter Schnittparameter erklärt werden, zum anderen zeigt sich auch die Geometrie des Werkzeuges aus der Bearbeitung am BAZ als vorteilhaft. Eine Abstufung an der äußeren Schneidkantenecke mit variablem Spitzenwinkel verringert die induzierte Biegelast am Werkstoff und kann damit die Delamination reduzieren. Der größere Spiralwinkel wirkt zudem einer „Push-Out“-Delamination entgegen. Diese war insbesondere am Werkzeug für die manuelle Bearbeitung stark ausgeprägt. In diesem Fall konnten auch die Bohrfolien zu keiner erkennbaren Verbesserung beitragen. Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass Bohrfolien eine tendenzielle Verbesserung der Bearbeitungsqualität erzielen, dieses jedoch stark an den Prozess gekoppelt ist. Insbesondere für das manuelle Bohren muss noch eine gezielte Auslegung der Bohrfolien erfolgen.

Im weiteren Fortgang gilt es, die unterschiedliche geometrische Bohrgestaltung der Werkzeuge miteinander zu vergleichen, um den Effektanteil der Folierung auf die Bearbeitungsqualität weiter differenziert bewerten zu können. Eine tribologische Untersuchung zeigt, auf welche Wirkmechanismen eine Qualitätsverbesserung zurückgeht. Unter der Annahme von Abstützungseffekten und einer optimierten Schmierung der ansonsten trockenen Bearbeitung durch schmierfähige Folienbestandteile, kann die erzielte Verbesserung erklärt werden. Da die Bohrfolien bei einigen Qualitätsmerkmalen Verbesserungen gezeigt haben, müssen die entsprechenden Kausalitäten erforscht werden, um damit weiteres Potenzial zu erschließen. Zuletzt gilt es ferner, die veränderten Bedingungen der Zerspanung auch im Rahmen einer Prozessparameterstudie genau abzustimmen und zu optimieren.

Ziel einer möglichen Produktentwicklung für die im industriellen Umfeld häufig eingesetzten manuellen Bearbeitungen könnten leicht aufzubringende Bohrfolienpads mit Abzugslaschen darstellen, welche den Werkstoff um die Bearbeitungszone herum schützen. Weitergehend können die Folien bereits mit einem Trockenschmierstoff, ähnlich der bereits getesteten Folien, versehen sein, sodass eine Schmierwirkung erzielt werden kann. Die ansonsten trockenen manuellen Prozesse können somit zusätzlich verbessert und die Werkzeugstandzeit kann damit verlängert werden. Die positiven Ergebnisse der maschinellen CNC-Bearbeitung bestätigen das Potenzial dieses Ansatzes, legen allerdings auch offen, dass eine genaue Rezeptur und Abstimmung der Folienzusammensetzung zur effektiven Wirkung notwendig ist.

Literatur

[1] Heisel, U.; Schall, M; Pfeifroth, T.: Zirkular zu mehr Qualität? WB Werkstatt + Betrieb, (2011) 1/2, S. 58–61

[2] König, W. Graß, P.: Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. Annals of the CIRP 38 (1989) 1, pp. 119–124

[3] Abrão, A. M.; Faria, P. E.; Rubio, J. C. et al.: Drilling of fiber reinforced plastics: A review. Journal of Materials Processing Technology 186 (2007) 1–3, pp. 1–7
[4] Aurich, J.C.; Dornfeld, D.; Arrazola, P. J.; et al.: Burrs-Analysis, control and removal. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 2, pp. 519–542
[5] Sheikh-Ahmad, Jamal Y.: Machining of polymer composites. New York, London: Springer-Verlag 2009
[6] Beckenlechner, R.; Herbst, B.: Kühlschmierstoffe für die spanende Bearbeitung. Lightweight design, 8 (2015), S. 38-43
[7] Davim, J.; Reis, P.: Damage and dimensional precision on milling carbon fibre-reinforced plastics using design experiments. Journal of Materials Processing Technology 160 (2005) 2, pp. 160–167
[8] Gururaja, S.; Ramulu, M.: Analytical formulation of subsurface stresses during orthogonal cutting of FRPs. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 41 (2010) 9, pp. 1164 –1173
[9] Königsreuther, O.: Neue Kühlschmiermittel sollen CFK-Zerspanung vorantreiben. MaschinenMarkt, 2014, Internet: http://www.maschinenmarkt.vogel.de/neue-kuehlschmiermittel-sollen-cfk-zerspanung-vorantreiben-a-456777/, zuletzt abgerufen am 15.01.2016

Bild 1. Bohrer für BAZ-Anwendung (oben), Bohrer für die Anwendung auf der Standbohrmaschine (unten)
Bild 2. Konstruierte Spannvorrichtung zur beidseitigen Probenbefestigung
Bild 3. Bohrkulisse mit eingespannten Versuchsplatten (exemplarisch)
Bild 4. Delaminationsfaktor beim CNC-Bohren von CFK-Gewebe mit Polymerfolien (Eintrittsseite)
Bild 5. Qualität des Bohrungseintritts wird durch den Schutzeffekt von Folien verbessert
(links: Folierung nach Bearbeitung; rechts: entfernte Folierung)
Bild 6. Darstellung der Ausfransungserscheinungen an der Austrittsseite bei der manuellen Bohrbearbeitung relativ zur Gesamtfläche der Bohrung nach Formel 2
Bild 7. Delaminationsfaktor an der Bohreraustrittsseite beim manuellen Bohren

Tabelle 1. Darstellung der technischen Spezifikationen der verwendeten Folierungsarten
Tabelle 2. Prozessparameter der experimentellen Untersuchung
Tabelle 3. Varianzanalyse für gemessenen Delaminationsfaktor nach Formel 1 an der Eintrittsseite bei der CNC Bohrbearbeitung
Tabelle 4. ANOVA für Ausfransungen an der Bohreraustrittsseite beim manuellen Bohren
Tabelle 5. Darstellung der Bearbeitungsqualität beim manuellen Bohren

Formel 1:

$$F_d = \frac{D_{delamination\,max}}{D_{Bohrung}}$$

Formel 2:

$$A_{Ausfransung} = \frac{A_{Bohrung} - A_{Fransen}}{A_{Bohrung}}$$