



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



**Institut für Fertigungstechnik und
Hochleistungslasertechnik**
Getreidemarkt 9/BA/OG 8
A-1060 Wien
<http://www.ift.at>

ETH Zürich
Dep. Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Frau Velona

Student Administration
Leonhardstrasse 21, LEE K 210
CH-8092 Zürich

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Friedrich Bleicher**
Institutsvorstand
T +43 1 58801 31101
F +43 1 58801 931101
M +43 664 1319424
E bleicher@ift.at

Ihr Zeichen / Ihre Nachricht vom
- / -

unser Zeichen

unser Bearbeiter / Nebenstelle
Bleicher / 31100

Datum
17.04.2017

Gutachten zur Dissertation

„Fundamentals of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Machining“

vorgelegt von Robert Fabian Voß MSc.

Zielstellung

Die Entwicklung der regulativen Auflagen zu Schadstoffemissionen in der Automobilindustrie einerseits und der Kostendruck in der Luftfahrt andererseits zeichnen dafür verantwortlich, dass in diesen beiden Branchen der Einsatz von alternativen Leichtbauwerkstoffen signifikant Verbreitung findet. Im Bereich der zivilen Luftfahrt verzeichnet der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen auf Basis von Kohlenstofffasern Wachstumsraten von jährlich mehr als 10%. Generell erstreckt sich der Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffen im konstruktiven Leichtbau von der Luft- und Raumfahrt über die Automobil-Anwendung (beispielsweise in elektrifizierten Fahrzeugen, im Motorsport, etc.) bis hin zur Gesundheits- und Sport-/Freizeitindustrie. Bei den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen werden die hervorragenden mechanischen Eigenschaften der Kohlenstofffaser zur Nutzung gebracht. Die Kohlenstofffaser weist gegenüber den metallischen Werkstoffen eine deutlich gesteigerte Festigkeit bei hohem Zug-Elastizitätsmodul auf. Um diese unidirektionalen Eigenschaften in einem Bauteil mit zumeist mehrachsiger Beanspruchung günstig zu nutzen, werden in der Praxis Faserbündel (Rovings) mit mehreren tausend Einzelfasern eingesetzt, aus denen Gewebeformen erstellt werden. Diese Gewebeformen werden ihrerseits wiederum in mehreren Lagen angeordnet und derart letztlich komplexe Bauteile geformt. In die Faserstruktur wird die Kunststoffmatrix infiltriert, wobei dazu unterschiedlichste Verarbeitungstechnologien zur Anwendung kommen. Für die spanende Bearbeitung stellen die mechanischen Eigenschaften

der Faser wie auch die Werkstoff-Inhomogenität bisher noch nicht zufriedenstellend beherrschte Randbedingungen dar. Dies gilt insbesondere für die Bohrbearbeitung mit den verfahrensspezifischen Randbedingungen und den daraus resultierenden Qualitätseinbußen, wie Faserbrüchen, Delamination oder Ausfransungen.

In den neusten Flugzeugmodellen erreicht der Gewichtsanteil von Kohlenstofffaserverstärkten Polymeren (CFRP oder CFK) bereits eine Größenordnung von 50% bis 60%. Im Bereich des Flugzeugrumpfes finden Komponenten mit Lagenaufbau aus Ti-Legierungen und CFK-Anwendung. Die bevorzugt eingesetzte Verbindungstechnik ist die Nietverbindung. Die dabei erforderliche Anzahl an Bohrungen nimmt erhebliche Größenordnungen an; für einen Airbus A350 sind beispielsweise 1,2 Mio. Bohrungen herzustellen. Zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit (mittel-)europäischer Unternehmen sind ein effizienter Einsatz der Zerspanungstechnik und damit die Optimierung des Zusammenwirkens von Werkzeug, Werkstückwerkstoff und Fertigungsprozess erforderlich. Die Entwicklung einer leistungsfähigen, jedoch kosteneffizienten Bohrbearbeitung – unter Berücksichtigung der Qualitätsanforderungen in der Luftfahrt – bedarf daher einer Optimierung im Sinne einer gesamtheitlichen Systembetrachtung.

Hier setzt die vorgelegte Arbeit mit dem Ziel an, die Wirkmechanismen in der Bohrbearbeitung von CFK-Werkstoffen detailliert zu analysieren, insbesondere den Einfluss der Mikrogeometrie der Schneide zu untersuchen und letztlich für die Bohrbearbeitung eine Optimierung des Zerspanungsvorgangs zu erreichen. Die vorgelegte Arbeit befasst sich inhaltlich mit folgenden Schwerpunkten:

- Grundlegende Zerspanungsversuche von unidirektionalen CFK im orthogonalen Schnitt
- Charakterisierung des Verschleißes an der Werkzeugschneide mit Hilfe eines Beschreibungskriteriums „Gerade – Ellipse – Gerade“
- experimentelle Untersuchung des Reibverhaltens beim Bearbeitungsprozess
- Entwicklung eines analytischen Modellansatzes zur Bestimmung der Zerspanungskräfte in der orthogonalen Bearbeitung von unidirektionalen CFK
- neuartiger Ansatz zur Bewertung der Bohrungsqualität
- Optimierung der Bohroperation unter Berücksichtigung des Einflusses lokaler Schneidkantenpräparation auf die Bearbeitungsqualität beim Bohren mit Spiralbohrern
- Orbitalbohren

Für die experimentellen Untersuchungen wurden definierte CFK-Werkstoffe eingesetzt. Einerseits wurden Testwerkstücke mit unidirektional ausgerichteten Fasern IMA—12K mit 12.000 Fasern pro „Roving“ und einem Matrix-Werkstoff HexPly M21 mit 66 % Gewichtsanteil an Fasern, bei einer Zugfestigkeit von 3.050 MPa, eingesetzt. Als zweiter Testwerkstoff wurde ein Gewebe AS4-6K mit 6.000 Fasern pro „Roving“ und dem Matrix-Werkstoff HexPly M21 verwendet. Der Gewichtsanteil der Fasern mit einer Zugfestigkeit von 880 MPa lag bei 65 %.

Wissenschaftlicher Inhalt

In Kapitel 1 führt Herr Voß in das Thema des Leichtbaus unter Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden ein und beleuchtet dabei die Entwicklung der Anwendung im Bereich der Luftfahrt.

Er skizziert die Bedeutung der kohlenstofffaserverstärkten Polymere in der industriellen Anwendung und zeigt den steigenden Bedarf auf. Daran lässt Herr Voß in Kapitel 2 einen inhaltlich ausführlichen und sorgfältig recherchierten Überblick über den Stand der Technik und der Forschung zur Zerspanung von CFK anschließen. Er thematisiert insbesondere die Grundlagenkenntnisse zu den Zerspanungsmechanismen aus Orthogonalschnitt-Untersuchungen und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse bei unterschiedlicher Faserorientierung. In diesem Überblick fasst er auch die Kenntnisse zur Fräs- und Bohrbearbeitung zusammen. Der Kandidat zeigt dabei auch den Stand der Technik zur Qualitätsbeurteilung von Bohrungen – insbesondere beim Ein- und Austritt des Werkzeuges – auf. In diesem Zusammenhang weist Herr Voß auch auf Testverfahren hin, welche den Nachweis des Einflusses der Bohrungsqualität auf die unmittelbare Bauteilfestigkeit um das Bohrloch geben. Ergänzend zum Qualitätsbezug geht Herr Voß auf die Werkzeuggeometrie und die Gestaltung der Schneidkante ein. Er stellt dar, dass die Mikrogeometrie der Schneide einen entscheidenden Einfluss auf die Bearbeitungsqualität ausübt und in Wechselwirkung mit dem Werkzeugverschleiß steht. Der Einfluss der Faserausrichtung relativ zur Richtung der Schnittgeschwindigkeit wird dabei diskutiert, und bisherige Ansätze zur modelhaften Beschreibung der Zerspanungskräfte werden zusammengefasst. Dabei geht Herr Voß allgemein auf die Zerspanungsmechanismen ein und stellt Erkenntnisse zur mechanischen Belastung des Schneidkeils und der in der Zerspanungszone auftretenden Reibung dar. Dabei bildet die Charakterisierung der Schneidkanten­geometrie einen thematischen Schwerpunkt. Der Kandidat zeigt dabei die messtechnische Problematik in der Bestimmung der Mikrogeometrie einer Schneidkante auf und verweist auf die daraus resultierende Unsicherheit in der messtechnischen Evaluierung von Schneidkanten. Herr Voß verweist dabei auf die Erkenntnisse von Herrn Henerichs und hebt die Ergebnissensitivität der Geradeninterpolation sowohl an der Span- als auch an der Freifläche sowie der Kreiseinpassung an der Schneidkante eines Werkzeuges hervor. Er stellt zu dieser Thematik die derzeit bekannten Methoden dar. Aus diesen Analysen leitet Herr Voß auch den weiteren Forschungsbedarf ab.

Ein bedeutender Abschnitt dieses Kapitels widmet sich der aus dem Zerspanungsvorgang resultierenden Qualität der Bohrung, die eine integrale Bedeutung für die Anwendung in der Luftfahrt innehat. Zur Beherrschung der Komplexität in der Bohrbearbeitung von CFK-Werkstoffen müssen die spezifischen Schädigungsmechanismen ins Kalkül gezogen und deren Auswirkung beherrscht werden. Die Betrachtung ist insbesondere auf den Bohrungsein- und -austritt gerichtet. Hier verweist der Kandidat auf zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen des Einflusses des Bohrprozesses auf die Ein- und Austrittsstelle und diskutiert dazu den Einfluss der Kraftangriffspunkte auf die Faserlage für unterschiedliche Ausführungsformen von Spiralbohrern. Jedoch zeigt Herr Voß auch auf, dass zur Qualität bzw. zum Schädigungsmechanismus beim Bohreintritt und -austritt deutlich weniger Arbeiten und Erkenntnisse vorliegen.

In Kapitel 3 führt Herr Voß nun die Zielsetzung seiner Arbeit aus und fasst die Schwerpunkte seiner wissenschaftlichen Tätigkeit zusammen. Er hebt dabei die Themen der Modellbildung zur Beschreibung der Zerspankraft unter Berücksichtigung der Reibung und des Werkzeugverschleißes, die Untersuchung der Bohrungsqualität, die Schneidkantenpräparation an Bohrwerkzeugen und die experimentelle Untersuchung des Bohrprozesses von CFK-Werkstoffen hervor. Bei letzterer vergleicht Herr Voß die konventionelle Bohrbearbeitung mit dem Orbitalbohren. Daran lässt Herr Voß in Kapitel 4 Grundlagenversuche in Form des

Orthogonalschnitt-Versuches zur CFK-Bearbeitung anschließen. Herr Voß zeigt in diesem Kapitel die experimentelle Analyse des Zerspanungsvorgangs in der CFK-Bearbeitung und untersucht in den Grundlagenversuchen den Einfluss der Makro- und Mikrogeometrie auf die Prozesskräfte. Im Rahmen dieser Versuche vergleicht Herr Voß den Einfluss unterschiedlicher Schneidengeometrien und die Beeinflussung der Mikrogeometrie durch voranschreitenden Verschleiß. Diese Untersuchungen führt er in Kombination mit einer Variation der Karbonfaser-Ausrichtung in den Testwerkstücken aus. Er analysiert auf diesem Wege die resultierenden Trennmechanismen im Zerspanungsprozess, evaluiert den Reibungskoeffizienten durch den Einsatz eines Tribometers (cutting process tribometer - CP-T-Tribometer) und stellt diesen Ergebnissen eine qualitative Beurteilung des Zerspanungsergebnisses gegenüber. Hervorzuheben ist dabei, dass die Bestimmung des Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Faserorientierung und der Vorspannkraft auf den Kontaktbolzen erfolgt. Herr Voß zeigt, dass sich der Reibungskoeffizient bei den unterschiedlichen Randbedingungen in einer Größenordnung von ca. 0,11 bis 0,145 bemisst. Der CP-T-Test lässt zerspanungsrelevante Rahmenbedingungen für die Bestimmung des Reibungskoeffizienten zu. Er vergleicht diese Ergebnisse mit jenen eines Standardversuches auf Basis des „Pin-on-disc“-Tests (Stahl auf CFK), welcher initial zu höheren Werten führt und zusätzlich ein Einlaufverhalten erkennen lässt. Herr Voß zeigt in seinem Versuchsaufbau den wichtigen Einfluss der Relativgeschwindigkeit und der Werkzeuggeometrie auf, wobei er dabei von den definierten Probenbedingungen ausgeht.

In Kapitel 5 folgt nun eine detaillierte Abhandlung zur Entwicklung eines analytischen Kraftmodells zum Zerspanungsprozess von CFK-Werkstoffen. Herr Voß teilt dabei die Schneidkante in drei Abschnitte ein. Abschnitt 1 definiert sich als Spanflächensegment, welches von der Werkstückoberfläche bis hin zum Beginn der Schneidkantenverrundung reicht. Abschnitt 2 stellt die Zone der verrundeten Schneidkante dar und ergänzt sich durch einen Abschnitt 3, welcher im Wesentlichen von der Schneidkantenverrundung beginnend die Freifläche umfasst, so diese durch das Rückfedern des CFK-Werkstoffes in Berührung mit dem Werkzeug steht. Zu diesem grundsätzlichen Modellansatz bildet Herr Voß vier Sub-Modelle, welche unterschiedliche Faserrichtungen im Kontakt mit der Schneide repräsentieren. Sub-Modell 1 befasst sich mit der Faserorientierung $\theta = 0^\circ$, Submodell 2 mit dem Winkelbereich $15^\circ < \theta < 75^\circ$, Sub-Modell 3 mit $\theta = 90^\circ$ und final Sub-Modell 4 mit $105^\circ < \theta < 165^\circ$. In dem analytischen Schnittkraftmodell berücksichtigt er neben der Faserorientierung noch die Werkstoffeigenschaften selbst, die Werkzeuggeometrie und den Verschleißzustand sowie die Schnittgeschwindigkeit. Die genannten Sub-Modelle basieren auf den Grundlagenarbeiten von Zhang et al., Qi et al., Xu und Reifsnider. Wesentlicher Aspekt der Modellierung durch Herrn Voß ist dabei die Unterteilung des Schneiden- und Werkstückkontaktes in drei Abschnitte, deren Einzelergebnisse zur Gesamtkraft superponiert werden. Durch die Berücksichtigung von Korrekturfaktoren kann Herr Voß eine ausreichende Übereinstimmung der prädiktiv ermittelten Schnittkraft- und Normalkraftwerte mit Versuchswerten darstellen. Abschließend diskutiert Herr Voß auch noch die Übertragbarkeit dieser Modellbildung auf den Bohrprozess, wobei er die Notwendigkeit der Anpassung der Modellparameter auf die über den Radius des Bohrwerkzeuges veränderliche Schnittgeschwindigkeit hervorhebt.

Im folgenden Kapitel 6 widmet sich Herr Voß intensiv der Qualitätsbestimmung beim Bohreraustritt. Er schlägt dazu ein Schadenskriterium Q_d vor, in das einerseits die Schadensparameter zur Rissbildung, zur Delamination und zur Absplitterungen eingehen.

Andererseits berücksichtigen weitere Parameter des Schadenskriteriums auch die Größe und das Ausmaß der nicht durchtrennten Fasern in der Bohrung. In der Folge zeigt Herr Voß die Korrelation des Schadenskriteriums mit Geometrieparametern an der Schneidkante, insbesondere der Mikrogeometrie, welche wesentlich vom voranschreitenden Verschleiß determiniert wird. Mit Verweis auf die in Kapitel 2 dargelegte Definition der Mikrogeometrie der Schneidkante nach dem Beschreibungskriterium „Gerade – Ellipse – Gerade“ kann er zeigen, dass ein kleiner Radius r_{peak} , ein großer Radius r_{sg} und eine kürzere Strecke l_{γ} die Bohrungsqualität begünstigen. Unter Berücksichtigung dieser Parameter entwickelt Herr Voß ein Qualitätskriterium Q_{crit} für die Geometrie einer Schneidkante. Er zeigt auf, dass ein Wert von $Q_{\text{crit}} < 1$ als günstig für die Bohrungsqualität anzusehen ist. Herr Voß schafft damit eine verbesserte Methodik, um die Auswirkung der Schneidkantengestalt auf den Zerspanungsprozess zu beschreiben.

In Kapitel 7 nutzt Herr Voß nun die Erkenntnisse aus den vorherigen Untersuchungen bzw. zur Modellbildung und führt diese auf den Einsatz in experimentellen Untersuchungen der Bohrbearbeitung von CFK über. Dabei schränkt er sich auf die Anwendung der Bohrbearbeitung mit einem Durchmesser von 6,35 mm ein und bearbeitet Durchgangsbohrungen bei einer Probendicke von 8 mm. Ziel der Versuchsreihen ist es, durch die Optimierung der Mikrogeometrie an diamantbeschichteten Hartmetallbohrern (ca. 10 μm Schichtdicke) eine Verbesserung der Bohrungsqualität zu erzielen. Herr Voß benutzt zur Nachbehandlung der Schneidkanten einerseits eine Tangential-Laserbearbeitung und andererseits ein definiertes Standstrahlverfahren, bei dem ein Industrieroboter das Werkzeug in einer definierten Bewegung relativ zu einer Sandstrahldüse führt (nach Wyen). Herr Voß zeigt, dass durch eine Mikro-Bearbeitung der Schneidkante mit einem Piko-Sekundenlaser ein Selbstschärfeeffekt erreicht werden kann. Vorausgesetzt ist eine günstige Makro-Geometrie des Schneidkeils, wie in Kapitel 4 ermittelt. Bei einem kleinen Schneidkantenradius in der Größenordnung von 2 μm bis 4 μm in Kombination mit einer kurzen Länge l_{γ} können Schädigungen am Werkstück signifikant reduziert werden. Die Schneidkantenpräparation unter Einsatz des Sandstrahlens zeigt im Vergleich keine positiven Effekte. Weiterführend untersucht Herr Voß auch noch die Möglichkeiten einer veränderten Bearbeitungsstrategie. Er vergleicht dazu das konventionelle Bohren mit dem Orbitalbohren und verwendet dafür wieder den Bohrungsdurchmesser 6,35 mm, um eine Vergleichbarkeit zu den bisherigen Versuchsergebnissen zu gewährleisten. Die Versuche führt Herr Voß auf der Parallelkinematik Hexaglide aus, um deren Bahndynamik nutzen zu können. Für das Orbitalbohren wählt Herr Voß ein Werkzeug mit dem Durchmesser $d = 5$ mm mit gleichem Hartmetallsubstrat, wie es auch beim konventionellen Bohrwerkzeug zum Einsatz kommt. Die Diamantbeschichtung weist wieder eine Stärke von ca. 10 μm auf. Dieses Werkzeug verfügt im Gegensatz zum konventionellen Bohrwerkzeug allerdings über drei Schneiden. Auf Basis der experimentellen Untersuchungen und unter Berücksichtigung des Schadenskriterium Q_d kann Herr Voß die günstigen Eigenschaften der Orbitalbohrbearbeitung zeigen. Die wesentlichen Erkenntnisse sind dabei, dass die Vorschubkraft um Faktor 3,3 gesenkt und insbesondere die Qualität der Bohrbearbeitung gegenüber der konventionellen Bohrbearbeitung signifikant gesteigert werden konnte. Nachteilig wirkt sich die mit ca. Faktor 2 verlängerte Bearbeitungszeit aus, welche der Zirkularbewegung mit Vorschubgeschwindigkeit geschuldet ist. Herr Voß verweist abschließend darauf, dass der sich einstellende Schneidenverschleiß am Orbital-Bohrwerkzeug durch die Bahnbewegung steuerungstechnisch kompensiert werden kann.

Die Zusammenfassung in Kapitel 8 mit Ausblick auf weiterführende Entwicklungsansätze und ergänzende experimentelle Arbeiten schließt die Arbeit und rundet die Gesamtbetrachtung ab. Herrn Voß gelingt es erstmalig, durch Orthogonal Drehversuche mit kontinuierlichem Schneideneingriff den Einfluss der Faserorientierung und auch des Reibungskoeffizienten auf den Zerspanungsvorgang in der Bearbeitung von CFK-Werkstoffen detailliert zu analysieren. Dabei untersucht er auch den Werkzeugverschleiß und bewertet diesen mit Hilfe einer eigens entwickelten geometrischen Beschreibungsmethode. Zur Analyse der Bohrversuche verwendet er ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Qualitätsbewertungssystem für die Schneidkanten-Mikrogeometrie. Herr Voß entwickelt darüber hinaus ein analytisches Beschreibungsmodell für die Prädiktion der Schnitt- und Vorschubkraft, in welchem erstmals die Mikro-Geometrie der Schneidkante und damit auch der Verschleiß neben der Faserorientierung berücksichtigt werden kann. Er kann den Nachweis einer guten Übereinstimmung seines Modellansatzes mit den Versuchsergebnissen führen. Diese Erkenntnisse überträgt Herr Voß auf die Bohrbearbeitung und vergleicht das konventionelle Bohren mit Orbitalbohren. Durch eine Modifikation der Mikrogeometrie des Bohrwerkzeuges durch eine Laserbearbeitung zeigt Herr Voß die Möglichkeiten eines Selbstschärfeeffektes an der Schneide auf. Diese signifikant verbesserten Qualitätsergebnisse bewertet er mit Hilfe des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Qualitätsbewertungskriteriums. In weiterführenden Versuchen mit Orbitalbohren kann Herr Voß Verbesserungspotenzial in der Qualität des Bohrungsaustritts aufzeigen.

Gesamtheitlich betrachtet zeigt Herr Voß damit, dass auf Basis seiner Erkenntnisse eine Senkung der Prozesskräfte und eine Steigerung der Bohrungsqualität in der Bearbeitung von CFK in der Größenordnung von Faktor zwei bis drei gegenüber konventionelle Werkzeugen erreicht werden kann. Die von Herrn Voß vorgelegte Arbeit liefert einen wertvollen Beitrag zu einer bedeutenden Steigerung des Standverhaltens von Bohrwerkzeugen in der Zerspannung von CFK-Bauteilen. Dabei eröffnen die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte analytische Modellbildung zum Zerspanungsvorgang und die Qualitätsanalyse neue Möglichkeiten in der Entwicklung von Werkzeugen für die Bearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffen.

Form und Ausdruck, Gesamteindruck

Herr Robert Voß hat mit der vorgelegten Arbeit gezeigt, dass er es versteht, selbständig wissenschaftlich und mit systematischer Vorgehensweise zu arbeiten. Die Dissertation überzeugt durch einen strukturierten Aufbau und durch eine sorgfältige Darlegung des für die Entwicklung der Arbeit relevanten Stands der Technik. Er ergänzt dies durch einen umfassend recherchierten Überblick über Modellierungsansätze zur Bestimmung der Zerspankraft bei der Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen. Die Ergebnisse seiner wissenschaftlichen Arbeit sind in klarer textlicher Beschreibung und auf Basis von sehr anschaulichen Abbildungen dargelegt. Die Arbeit, welche in englischer Sprache abgefasst ist, besticht durch eine flüssige Formulierung in den fachlichen Ausführungen, womit eine leichte Lesbarkeit verbunden ist. Der gewählte inhaltliche Aufbau mit kurzen Zusammenfassungen zum Abschluss einzelner Kapitel erweist sich für den Leser als eine angenehme Möglichkeit zur Reflexion von Inhalten. Den Anforderungen an eine Dissertation in Form und Ausdruck wird die vorgelegte Arbeit in jeder Hinsicht gerecht.

Herr Voß hat mit seiner Dissertation einen wissenschaftlich wertvollen Beitrag geleistet, welcher sich speziell durch die Grundlagenbetrachtung des Zerspanungsprozesses von Faser-

Verbundwerkstoff darstellt. Der dafür eingesetzte Orthogonalschnitt-Versuch mit gleichzeitiger Bestimmung des Reibungskoeffizienten eröffnet die Möglichkeit, den Einfluss der Faserorientierung detailliert zu untersuchen. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse nutzt Herr Voß zur Entwicklung einer analytischen Beschreibung der Schnitt- und Vorschubkraft. Fortfolgend gelingt es Herrn Voß, dieses verbesserte Verständnis zur Bearbeitung von CFK-Werkstoffen zur Optimierung der Bohrungsbearbeitung zu nutzen. Einerseits zeigt er ein signifikantes Verbesserungspotential in der konventionellen Bohrbearbeitung auf und andererseits führt er den Nachweis der Tauglichkeit der Orbitalbohrbearbeitung für die fertigungstechnische Umsetzung. Für die praktische Anwendung stellen diese Erkenntnisse einen außerordentlich interessanten Wissensgewinn dar. Herr Robert Voß hat seiner Arbeit auch einen Überblick über seine umfassende Publikationsleistung beigelegt.

Bewertung

Zusammenfassend empfehle ich daher dem Departement Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich die Annahme der vorgelegten Arbeit. Herr Robert Voß ist aus Sicht des Unterzeichneten damit zur Weiterführung seines Dissertationsverfahrens zuzulassen.

Wien, den 17.04.2017

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher
Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik
Technische Universität Wien