



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Institut für Fertigungstechnik und
Photonische Technologien
Getreidemarkt 9/BAVOG 8
A-1060 Wien
<http://www.ift.at>

Herrn
Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe
Vorsitzender des Promotionsausschusses

Fakultät Maschinenbau
Promotionsausschuss
Campus Nord, Einfahrt 4-7
Leonhard-Euler-Straße 5
D-44227 Dortmund

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Friedrich Bleicher
Institutsvorstand
T +43 1 58801 31101
F +43 1 58801 931101
M +43 664 60 588 3110
E bleicher@ift.at

Ihr Zeichen / Ihre Nachricht vom
- / 16.05.2019

unser Zeichen

unser Bearbeiter / Nebenstelle
Bleicher / 31100

Datum
07.06.2019

Gutachten zur Dissertation

„Entwicklung und Anwendung eines Herstellungsverfahrens von tiefen Bohrungen mit nicht kreisförmigen Querschnitten“

vorgelegt von Dipl.-Ing. Moritz Fuß

Zielstellung

In den heute eingesetzten industriellen Fertigungsprozessen nimmt die spanende Bearbeitung unverändert eine bedeutende Rolle ein. Zerspanungsvorgänge sollen hohe Zeitspannvolumina erreichen lassen - unter Berücksichtigung der Anforderungen an enge Toleranzen und komplexe Geometrien. Dies erfordert eine Optimierung des Zusammenwirkens von Werkzeug, Werkstückwerkstoff und Fertigungsprozess. Ein in diesem Sinne komplexes Forschungsthema stellt die Herstellung von Werkstücken mit tiefen Bohrungen dar, insbesondere, wenn deren Innengeometrie nicht kreisrund ausgeführt wird (beispielsweise zur Herstellung von hydraulischen Verdrängungsmotoren in der Explorationstechnik der Erdöl- und Erdgasindustrie). Aus diesem Umfeld leitet Herr Dipl.-Ing. Fuß die Zielsetzung der vorliegenden Dissertationsschrift ab. Er widmet sich der Fragestellung, eine Auskammertechnologie für Innenkonturen mit nicht kreisförmigem Querschnitt zu entwickeln, welche auf Basis eines spanenden Herstellungsverfahrens erstmalig die Bearbeitung von kleineren Durchmesserdimensionen ermöglicht. Er setzt dies in Form eines aktorisierten Werkzeugsystems um, bei dem die Schneide pro Umdrehung in Abhängigkeit der zu erzeugenden Profilkontur periodisch radial aus- und eingefahren wird. Es gelingt Herrn Fuß, dies für einen verhältnismäßig kleinen Werkzeugennendurchmesser von $d_{WN} = 46$ mm zu realisieren.

Wissenschaftlicher Inhalt

In Kapitel 1 führt Herr Dipl.-Ing. Fuß in das Thema der Bearbeitung von tiefen Bohrungen mit nicht kreisrunden Querschnitten und deren Anwendung ein. Er skizziert die Bedeutung der optimierten Auslegung von Bearbeitungsprozessen als Wettbewerbsfaktor. Daran lässt Herr Fuß in Kapitel 2 einen inhaltlich ausführlichen und sorgfältig recherchierten Überblick über den Stand der Technik und der Forschung zur Zerspanung anschließen, wobei insbesondere die Herstellung von innenkonturierten Bohrungen thematisiert wird. Der Kandidat zeigt dabei auf, dass speziell das Erreichen von kleinen Bohrungsdurchmessern von erheblicher funktioneller Bedeutung für die industrielle Anwendung wäre. Diese grundlegenden Betrachtungen werden von Herrn Dipl.-Ing. Fuß nachfolgend in Kapitel 3 auf die Zielsetzung und den abgeleiteten Forschungsbedarf übertragen. Hierbei fasst Herr Fuß den Schwerpunkt der Arbeit zunächst zusammen und gibt in Form einer übersichtlichen grafischen Darstellung einen Überblick zu den Arbeitsinhalten seiner wissenschaftlichen Tätigkeit. Dem folgt in Kapitel 4 die Vorstellung des entwickelten Zerspanungsverfahrens für nicht kreisrunde Querschnitte, dessen Arbeitsweise detailliert erläutert wird. Er entwickelt eine kinematische Lösung, um die Schneide pro Umdrehung in Abhängigkeit der zu erzeugenden Profilkontur periodisch radial aus- und einzufahren. Durch die radiale periodische Vorschubbewegung der Schneide resultiert eine profilabhängige Schnittgeschwindigkeitsänderung. Herr Dipl.-Ing. Fuß zeigt durch Berechnung, dass die Dynamik und die Belastung des gesamten Werkzeugsystems im Wesentlichen von der Werkzeugdrehzahl, der Konturtiefe und insbesondere von den Übergängen in der Innenkontur abhängig sind. Durch die Verfahrenskinetik beim Werkzeugeingriff variiert die Schnittrichtung entlang der Profilkontur und damit verbunden der Werkzeug-Neigungswinkel sowie der resultierende Freiwinkel der Nebenschneide. In Kapitel 5 kommt Herr Dipl.-Ing. Fuß zum Kern seiner wissenschaftlichen Arbeit und entwickelt dafür eine Versuchseinrichtung, die er schlüssiger Weise auf einer Tiefbohrmaschine integriert. Er lässt in Kapitel 6 die detaillierte Beschreibung des Werkzeugantriebs folgen. Herr Fuß verwendet eine rein mechanische Bewegungssteuerung, welche über die Rotationsbewegung der Hauptspindel und unter Einsatz einer Kurvenscheibe die radiale Auslenkung der Schneide ermöglicht. Diese Steuerkinematik ordnet er hinter der Hauptspindel an und überträgt die radiale Bewegung über ein Steuerrohr, welches im Bohrrohr mittig gelagert ist, mit rotierender Bewegung an den Bohrkopf. Über eine Exzenter-Kinematik wird diese rotatorische Pendelbewegung unter Einsatz eines Schiebemechanismus wieder auf eine radiale Bewegung übergeführt. Diese ohnehin schon herausfordernde Aufgabe erweitert Herr Fuß noch um eine Verstelleinrichtung zur Erzeugung einer Profilsteigung (gedrallte Bohrung), dies es ermöglicht, die unrunde Kontur über den Vorschubweg in der Winkellage zu verändern. Die axiale Vorschubbewegung der Maschine wird dabei mechanisch abgegriffen und durch ein Getriebe auf die Schablone übertragen. Diese Schablone dreht sich dadurch während der Bearbeitung in einem einstellbaren Übersetzungsverhältnis, wodurch die Kontur mit einer Steigung entlang der Vorschubachse erzeugt wird. Die von Herrn Fuß entwickelte Technologie kann daher als ein Innen-Nachform-Unrunddrehen beschrieben werden. In einem sehr ausführlich gestalteten Kapitel 7 weist der Kandidat zunächst in Grundlagenuntersuchungen die Funktionstauglichkeit der entwickelten Kinematik nach. Er versteht es dabei, auf Basis der Versuchsanordnung auf einer BTA-Tiefbohrmaschine neben der Profilform auch die gewünschte Profilsteigung entlang der Werkstückachse umzusetzen. Anhand von kinematischen Betrachtungen analysiert Herr Dipl.-Ing. Fuß die Eingriffsbedingungen der Schneide entlang deren Trajektorie. Er wählt auf Basis

dieser Überlegungen eine geeignete Schneidengeometrie und optimiert die kinematische Anordnung, insbesondere den Neigungswinkel. In Analogieversuchen kann Herr Fuß diese Eingriffsbedingungen bei stark variierendem Neigungswinkel von $\Delta\lambda = 90^\circ$ nachvollziehen, indem er einen spezifisch angepassten Aufbau für einen Orthogonalschnitt-Versuchsstand verwendet. Er kann so auf experimentellem Wege die auftretenden Zerspankraftkomponenten ermitteln und damit zeigen, dass sich die Passivkraft, anders als die Vorschub- und Schnittkraft, nicht in Abhängigkeit der variierenden Schnitttiefe entwickelt, sondern konstant mit kleiner werdendem Neigungswinkel linear signifikant zunimmt. Aus diesen Resultaten leitet Herr Dipl.-Ing. Fuß Richtwerte für die konstruktive Detailausführung wie auch für die nachfolgenden experimentellen Untersuchungen ab. Mit der Betrachtung der resultierenden Geschwindigkeiten und der Beschleunigung an der Schneide zeigt Herr Fuß, dass in der Mechanik des Antriebs bereits bei kleinen Werkzeugdrehzahlen von $n = 110$ U/min maximale Beschleunigungen in der Größenordnung von $a = 180$ m/s² auftreten. Daraus leitet er eine Limitierung in der maximal erreichbaren Schnittgeschwindigkeit von ca. $v_c = 30$ m/min ab. Daran anschließend lässt Herr Fuß weitere Untersuchungen zum dynamischen Verhalten des Werkzeugsystems folgen, um die dynamischen Belastungen an der Werkzeugschneide und am Antrieb zu analysieren. Diese variieren aufgrund unterschiedlicher Massen- und Größenverhältnisse. Das Prozesswissen zu den veränderlichen Eingriffsbedingungen vertieft er, indem Herr Fuß eine Spanbildungssimulation sowie eine Analyse zum Einfluss der Bohrrohrelastizität anschließt. Die gewonnenen Erkenntnisse nutzt er, um anhand von Versuchsreihen mit unterschiedlicher Schieber- und Schneidenanordnung nachzuweisen, dass eine sichere Prozessführung durch eine schräg zur Vorschubbewegung ausgerichtete Ausstellbewegung und durch den Einsatz einer Wendeschneidplatte mit Schutzfase erzielbar ist. Auf Basis dieser Erkenntnisse untersucht Herr Fuß in Kapitel 8 anhand von Zerspanungstests auch den Einfluss des Werkstückwerkstoffs und variiert dabei die Schnittparameter. Er kann die Flexibilität des Verfahrens hinsichtlich der Querschnittskontur nachweisen, indem er ovale, dreieckige und viereckige Konturen herstellt. Durch die messtechnische Überprüfung der Querschnitte von bearbeiteten Proben zeigt Herr Fuß auf, dass es zu Abweichungen zwischen dem im lastfreien Zustand eingemessenen Ausstellhub und der in den Experimenten erzielten Profilgeometrie kommt. Er weist schlüssig nach, dass dies durch die Nachgiebigkeit des Systems erklärbar ist. Demgemäß korrelieren diese Profilabweichungen auch mit der Festigkeit des zu zerspanenden Materials. Der Kandidat zeigt in Standzeituntersuchungen, dass es durch die außergewöhnliche Eingriffssituation mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und hohen dynamischen Wechselbeanspruchungen zu keinem kontinuierlichen Werkzeugverschleiß kommt. Er stellt fest, dass es bei voranschreitendem Werkzeugeinsatz wiederholt zu einem spontanen Bruch der Schneidkante kommen kann. Dies führt Herr Fuß auf eine fortschreitende Materialzerrüttung im Hartmetall oder einen sich rasch entwickelnden Abrasionsverschleiß zurück. Für die Aussteuerkinematik mit der Zwangsbewegung aus der mechanischen Kopplung zwischen der radialen Ausstellbewegung und der Rotation der Werkzeugspindel entwickelt Herr Fuß daher eine Lösung zum Wechsel der Schneide. Insbesondere der zunächst kraftfreie Wiederanschnitt gestaltet sich als durchaus herausfordernd, zumal die vorhandene Profilsteigung auch von der Bohrrohrtorsion beeinflusst wird. Durch die Möglichkeit des Schneidenwechsels kann Herr Fuß letztlich die gewünschte Bearbeitungslänge von bis zu $l = 2400$ mm erreichen. Allerdings lässt sich im Anschnitt an der zuvor erzeugten Profilsteigung, an der die Bearbeitung fortgeführt wird, eine erkennbare, geringfügige Querschnittsvergrößerung verzeichnen. Herr Fuß weist darauf

hin, dass diese Abweichungen in der Querschnittskontur durch eine Schablone mit korrigierter Kontur, welche die Bohrrohrelastizität und den Fehleranteil durch die schräge Ausstellbewegung kompensiert, deutlich verbessert werden kann. Die Zusammenfassung in Kapitel 9 mit Ausblick auf weiterführende Entwicklungsansätze und ergänzende experimentelle Arbeiten schließt die Arbeit und rundet die Gesamtbetrachtung ab.

Herrn Fuß gelingt es damit erstmalig, durch die im Rahmen der gegenständlichen Arbeit entwickelte Aussteuerkinematik komplexe nicht kreisförmige Querschnitte in tiefen Bohrungen herzustellen. Das entwickelte Verfahren erlaubt es, durch eine angepasste Prozessführung und durch die Möglichkeit eines Schneidplattenwechsels Fertigungslängen mit einem Aspekt-Verhältnis von $l/D = 65$ zu erreichen. Die dabei erzielbare Bearbeitungsgenauigkeit zeigt, dass dieses neuartige Verfahren die Schruppbearbeitung von nicht-rotationssymmetrischen Innenkonturen tiefer Bohrungen ermöglicht. Durch unterschiedliche Maßnahmen, beispielsweise einer Folgebearbeitung auf Basis eines Erodierverfahrens, kann die derart vorgefertigte Kontur in der geometrischen Genauigkeit verbessert werden. Für die Zielsetzung, ein wirtschaftliches Fertigungsverfahren für komplexe Innengeometrien zu entwickeln, konnte Herr Dipl.-Ing. Fuß mit seiner Arbeit einen bedeutenden Beitrag leisten. Die vorgelegte Arbeit zeigt einen hohen Grad an Originalität und umfasst eine fachliche Breite, die seinesgleichen sucht. Sie entspricht in jeder Hinsicht den Anforderungen, die an eine Dissertationsschrift zu stellen sind.

Form und Ausdruck, Gesamteindruck

Herr Dipl.-Ing. Fuß 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 der für die Entwicklung der Arbeit relevanten Methoden. Die Ergebnisse sind in klarer textlicher Beschreibung und auf Basis von anschaulichen Abbildungen dargestellt. Die Arbeit besticht durch eine flüssige Formulierung in den fachlichen Ausführungen, womit eine leichte Lesbarkeit verbunden ist. Den Anforderungen an eine Dissertation in Form und Ausdruck wird die vorgelegte Arbeit vollumfänglich gerecht.

Bewertung

Zusammenfassend empfehle ich daher der Fakultät Maschinenbau der Technischen Universität Dortmund die Annahme der vorgelegten Arbeit von Herr Dipl.-Ing. Fuß und die Fortführung des Promotionsverfahrens. Aus der Sicht des Unterzeichneten ist die Arbeit mit dem Kalkül „ausgezeichnet“ zu bewerten.

Wien, den 07.06.2019



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