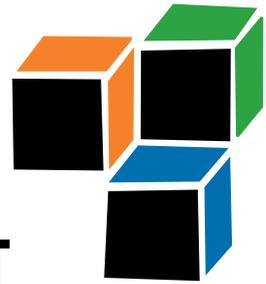


**Forschungsberichte aus
der Stiftung Institut für
Werkstofftechnik**
Bremen

IWT



Fertigungstechnik

Vibrationsunterstütztes
Bohren von
Werkstoffverbunden
aus CFK und Titan

Oliver Pecat

Band 73

**SHAKER
VERLAG**

Vibrationsunterstütztes Bohren von Werkstoffverbunden aus CFK und Titan

Dem Fachbereich Produktionstechnik
der
Universität Bremen

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Oliver Pecat

Gutachter : Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Ekkard Brinksmeier

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze

Tag der mündlicher Prüfung: 19. Februar 2018

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 73

Oliver Pecat

**Vibrationsunterstütztes Bohren von
Werkstoffverbunden aus CFK und Titan**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5919-9

ISSN 1437-7659

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Spanende und umformende Fertigungsverfahren sind unverzichtbare Bestandteile industrieller Prozessketten zur Herstellung hochwertiger Bauteile. In Abhängigkeit von der Bearbeitungsaufgabe und von den zu erreichenden Bauteileigenschaften sowie eingesetzten Werkzeugmaschinen und Zerspanwerkzeugen können diese Fertigungsverfahren in konventionelle sowie präzise und ultrapräzise Fertigungsverfahren untergliedert werden. Während die konventionellen Fertigungsverfahren zumeist als Bindeglied zwischen Vor- und Endbearbeitungsverfahren stehen, ist die spanende Präzisions- und Ultrapräzisionsbearbeitung dazu geeignet, als Endbearbeitungsverfahren komplexe Bauteilkomponenten mit Formgenauigkeiten im Submikrometerbereich und Oberflächenqualitäten im Nanometerbereich direkt herzustellen. Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Berichte stellen die aktuellen Forschungsergebnisse der Hauptabteilung Fertigungstechnik in der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) und des Labors für Mikrozerspanung (LFM) der Universität Bremen dar. Diese Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit den grundlegenden Wirkzusammenhängen bei trennenden und umformenden Bearbeitungsverfahren, der Entwicklung ökonomisch (effizient) und ökologisch (umweltbewusst, nachhaltig) optimierter Fertigungsprozesse und –prozessketten als auch den ultrapräzisen Endbearbeitungsverfahren für innovative hochgenaue Produkte der Optik und Mikrotechnik.

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte wird in der vorliegenden Arbeit die wirtschaftliche Herstellung schädigungsarmer Bohrungen in CFK/Titan-Werkstoffverbunden behandelt. Beim Bohren dieser Werkstoffverbunde kommt es aufgrund einer ausgeprägten Langspanbildung des metallischen Werkstoffs oftmals zu folgeschweren Prozessstörungen mit Auswirkungen auf die Qualität und Kosten zur Herstellung der Bauteile. Durch die Anwendung eines schwingungsunterstützten Bohrverfahrens sollen, bedingt durch eine gezielte Schnittunterbrechung, eine prozesssichere Spanabfuhr ermöglicht und Bohrungen in Faser/Metall-Werkstoffverbunden in einem Bearbeitungsschritt eingebracht werden. Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei die Ermittlung prozessspezifischer Kenntnisse zur Spanbildung, Spanformung und speziell der sich einstellenden Spanabfuhr für das vibrationsunterstützte Bohren, sowie deren Einfluss auf die Prozessgrößen und das resultierende Arbeitsergebnis. Auf Basis der hier gefundenen Zusammenhänge ist es erstmals möglich einen direkten Zusammenhang zwischen den Stellgrößen des Prozesses und dem Arbeitsergebnis herzustellen und Prozessstörungen durch Spänestau gezielt zu vermeiden.

Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift ist aus den Forschungsarbeiten während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik hervorgegangen. Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei meinem Doktorvater und Erstgutachter Herrn Professor Ekkard Brinksmeier für die fachliche Betreuung meiner Arbeit aber auch für die wohlwollende Unterstützung während meiner gesamten Arbeitszeit am Institut bedanken. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Professor Wolfgang Hintze für die Übernahme des Zweitgutachtens und die eingehende Durchsicht meiner Arbeit, sowie Herrn Professor Axel Herrmann, Herrn Dr. Sascha Fangmann, Herrn Winfried Wiesner und Herrn Raik Dräger für die Übernahme der Aufgaben im Prüfungsausschuss.

Herzlich bedanken möchte ich mich außerdem bei allen Mitarbeitern und Studierenden in der Abteilung Fertigungstechnik der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit immer tatkräftig unterstützt haben. Folgende würde ich gerne persönlich benennen: Herrn Dr. Daniel Meyer und Herrn Dr. Rüdiger Rentsch für die Durchsicht meiner Arbeit und die zahlreichen, sehr wertvollen Kommentare und Vorschläge. Herrn Eckhard Berthold und Herrn Andrej Gorzawski für die Hilfe bei der Planung der Versuchsaufbauten sowie der technischen Umsetzung. Meinem Bürokollegen Herrn Tebbe Paulsen, der mir immer ein kompetenter und freundschaftlicher Ansprechpartner war. Ein besonderer Dank gilt Herrn Ingo Meyer, der mich von Beginn an bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt hat und immer wieder neue, konstruktive Denkanstöße gegeben hat.

Die in der vorliegenden Arbeit gezeigten Forschungsergebnisse sind zum Teil im Rahmen von Industrieprojekten entstanden. Hier möchte ich nochmals Herrn Dr. Fangmann von der Airbus Group für die langjährige, außerordentlich angenehme Zusammenarbeit danken. Ganz herzlich möchte ich mich auch bei Herrn Michael Schmid von der Klenk GmbH & Co. KG und Herrn Edwin Roth von der Walter AG bedanken, die mich sehr oft mit hilfreichen Ratschlägen und der Bereitstellung von Werkzeugen unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Markus Dirscherl von der Firma LTI-Motion GmbH, der mit großem Engagement die Magnetlagertechnologie für die Bohranwendung zugänglich gemacht hat und die entstandene Versuchsanlage für meine Forschungen großzügig zur Verfügung stellte.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Anne und Michael Pecat, die meine Ausbildung und meinen beruflichen Werdegang stets mit großem Interesse verfolgt haben und mich in jeder Hinsicht unterstützt und motiviert haben. Meiner Freundin Sarah Hellwig möchte ich für ihre Geduld, ihr Verständnis und die aufmunternden Worte danken, die sie in anstrengenden Phasen für mich hatte. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Darmstadt, im April 2018

Oliver Pecat

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	IV
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Kenntnisse	4
2.1 Bearbeitung von CFK	4
2.1.1 Eigenschaften von CFK und Faserverbundkunststoffen	4
2.1.2 Zerspanung von CFK.....	6
2.1.3 Bohren von CFK	8
2.2 Bearbeitung von Titanlegierungen.....	10
2.2.1 Eigenschaften von Titanlegierungen.....	10
2.2.2 Zerspanung von Titanlegierungen	11
2.2.3 Bohren von Titanlegierungen	13
2.3 Bearbeitung von Werkstoffverbunden	16
2.3.1 Eigenschaften von Werkstoffverbunden	16
2.3.2 Anforderungen an Bohrungen in CFK/Ti-Werkstoffverbunden.....	18
2.3.3 Bohren von CFK/Ti-Werkstoffverbunden	19
2.4 Schwingungsunterstütztes Bohren	28
2.5 Fazit zum Stand der Kenntnisse.....	31
3 Forschungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise	34
4 Versuchsumfeld.....	38
4.1 Versuchsmaschinen und Schwingungserzeugung	38
4.2 Werkstückaufspannung	39
4.3 Bohrwerkzeuge.....	40
4.4 Versuchswerkstoffe	41
4.4.1 Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK).....	41
4.4.2 Metallische Werkstoffe	42
4.5 Mess- und Analysetechniken.....	42

4.5.1	Prozesskräfte	42
4.5.2	Prozesstemperaturen	44
4.5.3	Spanabfuhr	45
4.5.4	Bohrungsdurchmesser	47
4.5.5	Grathöhe	47
4.5.6	Rauheitskenngößen	48
4.5.7	Metallographische Schliffbilder	48
4.5.8	Härtemessung	48
4.5.9	Eigenspannungsuntersuchung an Titanproben	49
4.5.10	Plastische Verformung in der Randzone	50
4.5.11	Werkzeugverschleißmessung	52
4.5.12	Spangradmaß	53
5	Kinematische Analyse des Vibrationsbohrprozesses	54
5.1	Berechnung der überlagerten Vorschubbewegung	55
5.2	Geometrische Eingriffsverhältnisse	56
5.3	Abgeleitete Kenngrößen zur Beschreibung der Spanungsformen	58
5.4	Abhängigkeit zwischen Schnittparametern und Spanungskenngrößen	60
5.5	Fazit	63
6	Experimentelle Bohrversuche in metallischen Werkstoffen	64
6.1	Gegenüberstellung: Konventionelles - und Vibrationsbohren	64
6.2	Mechanismen der Spanabfuhr beim Vibrationsbohren	74
6.3	Einfluss von Stellgrößenvariationen auf die Zerspanbarkeit in metallischen Werkstoffen bei fester spezifischer Frequenz	80
6.3.1	Versuchsplanung (feste spezifische Frequenz)	80
6.3.2	Ergebnisse (feste spezifische Frequenz)	81
6.3.3	Einfluss des Schmierbedingungen	91
6.3.4	Fazit	92

6.4	Einfluss von Stellgrößen auf die Zerspanbarkeit in metallischen Werkstoffen bei variiertem spezifischer Frequenz	93
6.4.1	Versuchsplanung (variierte spezifische Frequenz)	93
6.4.2	Ergebnisse (variierte spezifische Frequenz)	95
6.4.3	Abhängigkeit zwischen Prozesseingangsgrößen, Spanabfuhrqualität und Arbeitsergebnis	115
6.4.4	Einfluss unterschiedlicher Werkstoffe	118
6.4.5	Fazit	125
7	Experimentelle Bohrversuche in Werkstoffverbunden aus CFK und Titan	127
7.1	Versuchsplan	127
7.2	Ergebnisse	129
7.3	Randzoneigenschaften gebohrter CFK- und Titanwerkstoffe	138
7.4	Randzoneigenschaften im Titan	140
7.5	Fazit	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	151
9	Literaturverzeichnis	157

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
\hat{c}_v	-	Variationskoeffizient
A	mm	Amplitude
a_p	mm	Schnitttiefe pro Orbitalumdrehung
C	s	Haltezeit
c_r	-	Spanabfuhrindex
D_b	mm	Bohrungsdurchmesser
d_b	mm	Bohrerdurchmesser
D_{vb}	mm	Vorbohrdurchmesser
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E_{spez}	N/mm ² g	spezifischer E-Modul
F	mm	axialer Vorschub
F_f	N	Vorschubkraft
$F_{f,max}$	N	maximale Vorschubkraft
f_m	1/s	gemessene Spanausstoßfrequenz
f_s	1/s	Frequenz der Schwingung
F_s	-	spezifische Frequenz (in Schwingungen/Umdrehung)
f_{th}	1/s	theoretische Spanerzeugungsfrequenz
FV	N	Prüflast
f_z	mm	Vorschub pro Zahn
$f_{z,max}$	mm	maximaler Vorschub pro Zahn
G	N/mm ²	Schubmodul
HB	-	Brinellhärte
h_G	µm	Grathöhe
M	Nm	Drehmoment
m_c	mg	Spanmasse
m_{cu}	mg	Spanungsmasse
$M_{z,max}$	Nm	maximales Drehmoment
N	min ⁻¹	Drehzahl
n_B	-	Bohrungsanzahl
p_v	s [°] kg	Prozessindex
QMW (f_m)	1/s	Quadratisches Mittel der gemessenen Spanausstoßfrequenz f_m

R	s	Rückzugszeit
Ra	μm	Mittenrauwert
R _m	N/mm ²	Zugfestigkeit
R _{p0,2}	N/mm ²	Streckgrenze
R _{spez}	N/mm ² g	spezifische Zugfestigkeit
Rz	μm	Gemittelte Rautiefe
S	mm	Werkstückdicke
s _a	mm	axiale Vorschubposition/Bohrtiefe
s _b	mm	Spanbogenlänge
s _e	μm	Eckenabstand
s _{kr}	-	Spankrümmungsindex
s _r	μm	Randabstand
T	°C	Temperatur
T	s	Zeit
t _A	μm	Abrasionstiefe
t _b	mm	Bohrtiefe
t _d	mm	Messtiefe
t _e	s	Eingriffszeit
t _t	s	Totzeit
t _w	mm	Wandstärke
VB	μm	Verschleißmarkenbreite
VB _{max}	μm	maximale Verschleißmarkenbreite
v _c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
V _f	%	Faservolumengehalt
v _f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v _{f,e}	mm/min	axiale Eintrittsgeschwindigkeit
v _{fa}	mm	axiale Vorschubgeschwindigkeit
v _{ft}	mm	tangentiale Vorschubgeschwindigkeit
Z	-	Zähnezahl
A	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
A	°	Winkelstellung in der Bohrung
α _c	°	Spangradmaß
α _{cu}	°	Spannungsgradmaß
Δ	°	Drallwinkel
ΔD _b	mm	Bohrungsdurchmesserabweichung
Δl	μm	Verformung
Δs _r	mm	Ausgangslänge der Schleifriefe

E	-	Emissionsgrad
Θ	°	Faserwinkel
N	-	Querkontraktionszahl
P	g/cm ³	Dichte
Σ	°	Spitzenwinkel
Σ	N/mm ²	Eigenspannung
$\sigma (f_m)$	1/s	Standardabweichung der gemessenen Spanausstoßfrequenz f_m
Φ	-	Umformgrad
Φ	°	Werkzeugdrehwinkel
Ψ	°	Kippwinkel
Ω	min ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

Abkürzung**Bedeutung**

Al	Aluminium
CBN	kubisches Bohritrid
CFK	Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computerized Numerical Control
Cu	Kupfer
Fa.	Firma
$F_{f,min}$	min. Vorschubkraft
FFT	Schnelle Fourier-Transformation
FVK	Faserverbundkunststoffe
GLARE	glasfaserverstärktes Aluminium
HM	High Modulus
HSK	Hohlschaftkegel
HAST	High Strain Tensile
HAT	High Tensile
IK	Innenkühlung
IM	Intermediate Modulus
iMMS	interne Minimalmengenschmierung
IWT	Stiftung Institut für Werkstofftechnik
K	Kalium
KSS	Kühlschmierstoff
MMS	Minimalmengenschmierung
$M_{z,min}$	min. Drehmoment
ODU	Orbital Drilling Unit

PKD	polikristalliner Diamant
S	Schwingung(en)
Ti	Titan
U	Umdrehung
DU	unidirektional
VHM	Vollhartmetall