TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Vitali Dejkun

Methode zur rechnerunterstützten technologischen Prozessauslegung für die Zerspanung von Zirkondioxid

Schriftenreihe des PTW „Innovation Fertigungstechnik“

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

TU DARMSTADT

Methode zur rechnerunterstützten technologischen Prozessauslegung für die Zerspanung von Zirkondioxid

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Vitali Dejkun, M. Sc.

aus Karaganda

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Tag der Einreichung:	24. Juli 2019
Tag der mündlichen Prüfung:	27. November 2019

Darmstadt 2019

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Vitali Dejkun

Methode zur rechnerunterstützten technologischen Prozessauslegung für die Zerspanung von Zirkondioxid

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7349-2
ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Medizintechnik im Allgemeinen und die Dentaltechnik im Speziellen stellen einen Innovationsschwerpunkt in Deutschland dar. In der Dentaltechnik, insbesondere in der prothetischen Zahnbehandlung, werden zunehmend digitale und automatisierte Prozessketten eingesetzt. Zudem werden bereits heute mehr als 70% des Zahnersatzes aus Zirkondioxids gefertigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine automatisierte Prozessentwicklung zur materialschädigungsfreien Fertigung des Zahnersatzes entwickelt. Auf dieser Grundlage wird der Nachbearbeitungsaufwand bestimmt und anhand der unterschiedlichen Produktgruppen bewertet. Die Arbeit leistet einen Beitrag zur Industrialisierung im Dentalbereich und ermöglicht die Kalkulation des finanziellen Vorteils bei der Fertigung vom Zahnersatz aus Zirkondioxid unter Anwendung der rechnerunterstützten Prozessauslegung. Es wurden zahlreiche Versuche zur Optimierung der technologischen Prozesse und Zerspanungsparameter durchgeführt. Hierbei, wurden sowohl die für die Bearbeitung geeigneten Prozessparameter als auch die Werkzeuggeometrie bestimmt. Der zu entwickelnde Optimierungsalgorithmus sowie die zugehörige Methodik können branchenübergreifend eingesetzt werden.

Darmstadt, im November 2019 Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Eberhard Abele für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Die umfassende Unterstützung und die konstruktiven Diskussionen während meiner gesamten Institutszeit habe ich sehr geschätzt.

Ebenso danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Reiner Anderl für die Übernahme des Koreferats, das fachliche Interesse und die eingehende Durchsicht der Arbeit

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre, die eine gute Grundlage für produktive Zusammenarbeit schuf. Mein besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Bürokollegen Herrn Sören Dietz und Herrn Stefan Mischliwski für ein angenehmes Arbeitsklima im Büro, sowie Herrn Emrah Turan und Herrn Sebastian Güth für anregende Diskussionen, freundliche Unterstützung und ihren wichtigen Hinweisen.

Zudem konnte ich mich stets auf die Einsatzbereitschaft und die Kreativität von zahlreichen Studenten verlassen, die mich an verschiedenen Stellen bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Hier möchte ich besonders Maximilian Sattler, Yannick Moss, Imke Lorenz und Pascal von Keitz nennen.

Für die Durchsicht und Korrektur des Manuskripts möchte ich bei Frau Daria Vetrova, Herrn Hans-Georg Haupt und Herrn Matthias Borsdorf herzlich danken.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Frau Elena Dejkun und Sergej Dejkun, welche mir die Ausbildung erst ermöglicht haben und auf deren Unterstützung ich mich, unabhängig von Gegenbenheiten oder Vorhaben, blind verlassen kann. Vielen Dank für einen so großen Rückhalt und Motivation.

Darmstadt, November 2019 Vitali Dejkun

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1
2 Stand der Wissenschaft und Technik ... 3
2.1 Trends und Entwicklungen auf dem Dentalmarkt ... 3
2.2 Dentalprodukte ... 5
2.3 Prozessketten in der Dentaltechnik ... 7
2.4 Dentalkeramiken ... 9
2.4.1 Einteilung der Dentalkeramik ... 10
2.4.2 Herstellung von Oxidkeramiken ... 11
2.4.3 Eigenschaften von Oxidkeramik ... 13
2.5 Herstellung von keramischen dentalen Unikaten ... 17
2.6 Zerspanungsmechanismus ... 21
2.7 Schneidstoffe und Einsatzbedingungen ... 22
2.8 Zerspanbarkeit von Dentalkeramik ... 27
2.9 Grundlagen metaheuristischer Optimierungsverfahren ... 30
2.9.1 Genetischer Algorithmus ... 32
2.9.2 Simulated Annealing ... 36
2.10 Fazit zum Stand der Erkenntnisse ... 39
3 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise ... 41
3.1 Problemstellung ... 41
3.2 Zielsetzung ... 42
3.3 Vorgehensweise ... 42
4 Experimentelle Untersuchungen ... 46
4.1 Versuchseinrichtung ... 46
4.1.1 Versuchsmaschinen ... 46
4.1.2 Analytik und Messeinrichtungen ... 49
4.1.3 Versuchswerkstoff ... 52
4.1.4 Versuchswerkstücke ... 55
4.1.5 Versuchswerkzeuge ... 56
4.1.6 Versuchsplanung ... 58
4.1.7 Versuchsdurchführung ... 60
4.1.8 Messung der Oberflächenrauheit ... 61
4.1.9 Messung von Materialabplatzungen ... 63

4.2 Identifikation der Rand- und Einsatzbedingungen 64
4.2.1 Einfluss des Bearbeitungszentrums 64
4.2.2 Einfluss der Farbpartikeln 68
4.2.3 Einfluss des Werkzeuges 69
4.2.4 Einfluss der Bearbeitungsparameter- und -strategie 77
4.3 Ableitung der Einsatzempfehlungen für die Praxis 79
5 Mathematische Modellbildung 81
5.1 Statistische Auswertung 81
5.1.1 Normalverteilung 81
5.1.2 Nullhypothese 82
5.1.3 F-Test 83
5.1.4 Varianzanalyse 84
5.1.5 Regressionsanalyse 84
5.2 Ergebnisse der Regressionsanalyse 86
5.2.1 Werkzeugdurchmesser $D = 1$ mm 86
5.2.2 Werkzeugdurchmesser $D = 2$ mm 89
5.2.3 Werkzeugdurchmesser $D = 3$ mm 92
5.2.4 Fazit 95
6 Rechnergestützte Prozessauslegung 96
6.1 Simulationsbasierte Optimierung 96
6.2 Bewertungsmethoden 97
6.2.1 Gewichtete Summen 98
6.2.2 Pareto-Dominanz 98
6.3 Optimierungsverfahren 99
6.3.1 Simulierte Abkühlung (SA) 100
6.3.2 Genetische Algorithmen (GA) 108
6.3.3 Simulationsanzahl und Fazit 115
7 Wirtschaftlichkeit 117
7.1 Ermittlung der Kostenstruktur 117
7.2 Fertigungskosten 118
7.3 Prozessoptimierung 120
7.4 Fazit 124
8 Zusammenfassung und Ausblick 126
Literaturverzeichnis 129

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of variance
ATZ	Aluminia toughened zirconia
CAD	Computer aided design
CAE	Computer aided engineering
CAM	Computer aided manufacturing
CCD	Central composite design
DOE	Design of experiments
FSZ	Fully stabilized zirconia
ppm	Parts per million
PSZ	Partially stabilized zirconia
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
TZP	Tetragonal zirconia polykristall

Formelzeichenverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
a_e	Horizontale Zustellung	mm
a_p	axiale Zustellung	mm
D	Durchmesser des Werkzeugs	mm
f_z	Vorschub je Zahn	mm/Zahn
h	Spandicke	mm
K_A	Kalkulatorische Abschreibungen	€
K_{AW}	Anschaffungskosten der Maschine	€
K_E	Energiekosten	€
K_F	Fertigungskosten	€
K_f	Fixkosten	€
K_I	Instandhaltungskosten	€

K_L	Lohnkosten	€
K_M	Maschinenkosten	€
K_R	Raumkosten	€
K_W	Werkzeugkosten	€
K_{Werk}	Werkstückkosten	€
K_X	Restfertigungsgemeinkosten	€
K_Z	Kalkulatorische Zinsen	€
k_E	Energiekosten je Einheit	€
k_{nach}	Nachbearbeitungskosten je Einheit	€
k_v	Variable Stückkosten	€/Stk
k_W	Werkzeugkosten je Einheit	€
L	Lohnkosten je Stunde	€/h
L_f	Standweg	m
l_n	Länge der Messstrecke	mm
l_r	Einzelmessstrecke	mm
MB_{max}	Maximale Materialabplatzung	mm
n	Drehzahl	U/min
n_0	Zentrum	/
Q_w	Zeitspanvolumen	mm²/min
r_β	Schneidenradius	µm
R_a	Gemittelte Rauheit	µm
R_{max}	Maximale Rautiefe der gesamten Messstrecke	µm
R_q	Quadratischer Mittelwert der Profilabweichung	µm
R_z	Gemittelte Rautiefe	µm
R_{th}	Theoretische Rauheit	µm
s	Standardabweichung	µm
T	Standzeit	min
t_e	Fertigungszeit	min
t_g	Grundzeit	min
t_h	Hauptzeit	min
t_n	Nebenzeit	min
t_r	Rüstzeit	min
t_v	Verteilzeit	min

VB_{max}	Maximale Verschleißmarkenbreite	µm
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
z	Anzahl der Schneiden des Werkzeugs	Stk
α_s	Freiwinkel	°
β_s	Spanwinkel	°
σ	Standardabweichung	µm
σ^2	Varianz	µm
λ_c	Grenzwellenlänge	nm
µ	Mittelwert	µm