

**Prozessentwicklung und ökonomische Bewertung der
automatisierten Nachbearbeitung von additiv gefertigten
Dentalunikaten**

Dem 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

Dipl.-Ing. Sören Reiner Dietz

aus Hünfeld

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl

Tag der Einreichung: 24. Oktober 2016

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Januar 2017

Darmstadt 2017

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Sören Reiner Dietz

**Prozessentwicklung und ökonomische Bewertung
der automatisierten Nachbearbeitung
von additiv gefertigten Dentalunikaten**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5403-3

ISSN 1864-2179

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

Die Verschiebung der demografischen Altersstruktur, neue medizinische Werkstoffe, ein zunehmender Kostendruck und die Nachfrage nach kundenindividuellen medizintechnischen Produkten sind die Hauptanforderungen für die Medizintechnik der Zukunft. Um auf die unterschiedlichen Faktoren der Branchenentwicklung zu reagieren, bedarf es innovativer und individueller Produkte. Die Medizintechnik im Allgemeinen und die Dentaltechnik im Speziellen stellen einen Innovationsschwerpunkt in Deutschland dar und sind wortwörtlich in aller Munde. Insbesondere in der prothetischen Zahnbehandlung wird ein Wandel von handwerklichen Abläufen zu industriell geprägter Prozesstechniken zur Herstellung von Unikaten verzeichnet. Die angewandten Produktionstechniken aus teilautomatisierten auf- und abtragenden Prozessschritten werden dem medizinischen Kunden nachhaltige Prozesse und effiziente Methoden zur Produktion von prothetischem Zahnersatz zur Verfügung stellen. Besonders die zunehmende Technologiereife, von sogenannten 3D Druckverfahren, ermöglicht es bionische (Zahn-) Formen ohne den Einsatz von rotierenden Werkzeugen zu fertigen. Für die Serienfertigung von Unikaten konkurrieren diese neuen Verfahren mit etablierten hinsichtlich der Geometriefreiheit und den entstehenden Fertigungskosten. Um beide Ziele in hohem Maße zu erreichen, kann eine sequenzielle Abfolge von auf- und abtragenden Fertigungsschritten eingesetzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Prozessentwicklung zur sequenziellen Verkettung eines additiven Prozessschrittes durch selektives Laserschmelzen und einer abtragenden Bearbeitung durch das Fräsverfahren entwickelt. Auf dieser Grundlage wird der Nachbearbeitungsaufwand bestimmt und anhand unterschiedlicher Produktgruppen innerhalb der dentalen Technologie ökonomisch bewertet. Die Arbeit stellt einen Beitrag zur Industrialisierung von additiven Fertigungsverfahren dar und ermöglicht es auf Basis von Dentalprodukten finanziellen Vorteil beider Einzelverfahren und einer Verkettung anhand der zu fertigen Produktgeometrie zu bestimmen. Es wurden zahlreiche Versuche zur Zerspanungstechnologie von additiv gefertigten Werkstoffen und der Prozessverkettung durchgeführt. Dieses Prozessverständnis kann zur Entwicklung von sogenannten hybriden Prozessketten aus auf- und abtragenden Verfahren Branchenübergreifend eingesetzt werden.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Additive Fertigung und Dentale Technologie 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 und die Zusammenarbeit im Verbundforschungsprojektes „Rechnerunterstützte Entwicklung und Fertigung dentaler Produkte“ (COMMANDD).

Die Arbeit ist im Rahmen des genannten Verbundforschungsprojektes durch Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) sowie Kooperationsprojekten des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) durch Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) entstanden.

Während dieser Zusammenarbeit in Industrie- und Kooperationsprojekten konnte ich angenehme Kontakte und Freundschaften mit technischen und medizinischen Projektpartnern knüpfen, welche über die Zeit am PTW hinaus bestehen. Besonders möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Michael Kreis und Herrn Matthias Reck für die fachlichen Diskussionen und Ihre Zeit bedanken.

Zurzeit am PTW wurde ich durch gute Zusammenarbeit sowie ein produktives und freundliches Umfeld begleitet. Dafür möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen, der Werkstatt des Instituts und dem gesamten Supportteam herzlich bedanken.

Die Kooperation mit Studenten hat mich ebenfalls geprägt. Dafür möchte ich mich auf diesem Weg bei allen Studenten bedanken. Besonderer Dank gilt hierbei Sebastian Ullrich, Christina Fuchs und Andreas Brenner für ihre fachliche Zusammenarbeit und die angenehme Zeit.

Bereits in jungen Jahren wurde ich durch meine Familie auf meinem technischen Bildungsweg begleitet. Hierfür möchte ich mich bei meiner Mutter Gudrun und meinem Bruder Jonas bedanken, die mich dabei stets unterstützt haben.

Der größte Dank gilt meiner Freundin Anne. Dein großer Rückhalt und deine Motivation waren wichtige Bestandteile für mein Arbeiten an diesem Lebensprojekt.

Deine Liebe und Unterstützung hat mich durch Höhen und Tiefen begleitet und immer bestärkt diesen Weg weiterzugehen.

Germering, im Mai 2017

Sören Reiner Dietz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik, Wissenschaft und Forschung	3
2.1	Digitale dentale Prozesskette für Unikate	3
2.2	Dentallegierungen auf Kobaltbasis	7
2.3	Teilautomatisierte Verfahren zur Herstellung von metallischen Dentalrestaurationen	9
2.3.1	Additive Fertigungstechnik	10
2.3.2	Abtragende Fertigungstechnik und Zerspanungstechnologie	16
2.4	Messtechnik	21
2.5	Bewertung alternativer Fertigungsverfahren	23
3	Aufgabenstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise	29
3.1	Aufgabenstellung	29
3.2	Zielsetzung	30
3.3	Vorgehen und Eingrenzung des Anwendungsbereiches	31
4	Versuchseinrichtungen	33
4.1	Abtragende Fertigung	33
4.2	Additive Fertigung	36
4.3	Versuchswerkstoff	38
4.4	Digitale Produktentstehung im Hybridprozess	39
4.5	Mess- und Analyseeinrichtungen	42
5	Identifikation von Produktmerkmalen zur (Serien-) Fertigung von Dentalunikaten	47
6	Prozessentwicklung der hybriden Produktion	55
6.1	Digitale Produktentstehung im hybriden sequenziellen Prozess	56
6.2	Bestimmung der prozess- und featurespezifischen Bearbeitungszugabe	59
6.2.1	Analyse der Oberflächenrauheit	63
6.2.2	Fertigungsgenauigkeit abtragendes Verfahren	71
6.2.3	Fertigungsgenauigkeit auftragendes Verfahren	86
6.2.4	Übertragung des Bearbeitungsnullpunktes	94

6.2.5	Ableiten der benötigten selektiven Gesamtbearbeitungszugabe	109
6.3	Verifizierung der ermittelten Bearbeitungszugabe	112
6.3.1	Verifizierung der Nullpunktübertragung	113
6.3.2	Verifizierung anhand dentalnaher Geometrie.....	115
6.3.3	Verifizierung Rauheit	121
7	Untersuchung des Werkzeugverschleiß	125
7.1	Repräsentativer Bearbeitungsprozess und Messvorgehen.....	129
7.2	Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit der Haupteinflussfaktoren.....	134
7.3	Ableiten des Werkzeugverschleiß für Dentalunikate	143
8	Anwendung und Bewertung der hybriden Produktentstehung von Dentalunikaten.....	149
8.1	Modellaufbau	152
8.2	Parametrisierung des Simulationsteils Maschine	154
8.3	Ermittlung der Kostenstruktur	162
8.4	Ergebnisse der Prozesssimulation.....	166
9	Zusammenfassung und Ausblick	179
9.1	Zusammenfassung.....	179
9.2	Ausblick	181
10	Literaturverzeichnis	183
11	Anhang	193
11.1	Werkzeugtechnologie	193
11.1.1	Indirekte Maschinengenauigkeit des Fräsbearbeitungszentrums	193
11.1.2	Werkzeugparameter zu Kapitel 6.3.3	194
11.1.3	Werkzeugparameter zu Kapitel 6.3.2	196
11.2	Voraussetzung und Formelmente der indirekten Prüfung der Maschinengenauigkeit einer Dentalfräsmaschine mit Rondenspannsystem	198
11.3	Messvorgehen zur Bestimmung der Verschleißmarkenbreite	200