

Potenziale und Grenzen des Mikroschneidens zur Herstellung optischer Funktionsflächen

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von

M.Sc. Lars Schönemann

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Ekkard Brinksmeier
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg (HSU Hamburg)

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Februar 2014

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 62

Lars Schönemann

**Potenziale und Grenzen des Mikroschneidens
zur Herstellung optischer Funktionsflächen**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2674-0

ISSN 1437-7659

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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.

Die vorliegende Arbeit widmet sich dem spanenden Fertigungsverfahren „Mikroschneiden“ zur Herstellung prismatischer Mikrostrukturen und verfolgt das Ziel, technologische, informationstechnische, wirtschaftliche und physikalische Grenzen des Verfahrens zu erarbeiten und dessen Potenzial für eine industrielle Anwendung aufzuzeigen. In diesem Zusammenhang werden umfangreiche theoretische Überlegungen zum Mikroschneiden angestellt und es wird in experimentellen Arbeiten das Skalierungsverhalten des Verfahrens auf Einzelstrukturebene sowie anhand der Bearbeitung von komplexen Funktionsflächen untersucht. Darüber hinaus werden Strategien erarbeitet und umgesetzt, die das Mikroschneiden beschleunigen und so eine wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens in naher Zukunft ermöglichen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Mikrozerspanung (LFM) resp. an der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT). Ohne die Unterstützung von vielen wundervollen Menschen wäre sie garantiert nicht zu dem geworden was sie heute ist.

In erster Linie möchte ich mich bei den beiden Gutachtern dieser Arbeit bedanken. Meinem Doktorvater und Erstgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Ekkard Brinksmeier gilt mein besonderer Dank für die fortwährende Unterstützung und seinen wissenschaftlichen Rat während der Erstellung dieser Dissertationsschrift. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg für die kurzfristige Übernahme des Koreferats meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich den anderen Mitgliedern der Prüfungskommission. Ich habe mich insbesondere gefreut Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Gläbe hierfür gewinnen zu können. Durch ihn habe ich nicht nur meinen Weg in das LFM gefunden, sondern es war auch eine seiner genialen Ideen, welche die Grundlage für diese Dissertation bildete. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß danke ich für die (nicht obligatorische) Übernahme des Vorsitzes in meiner Prüfungsgruppe und darüber hinaus für sein Engagement im Aufbau des Studienganges Systems Engineering, durch den ich erst zu dem Entschluss gekommen bin ein ingenieurwissenschaftliches Studium an der Universität Bremen aufzunehmen. Herrn Dr.-Ing. Kai Rickens danke ich für die Mitwirkung im Prüfungsausschuss sowie für seinen fortwährenden technischen und wissenschaftlichen Rat während meiner Zeit im LFM. Außerdem danke ich Herrn B. Sc. Pablo Mejia für die Mitwirkung im Prüfungsausschuss.

Nicht unerwähnt bleiben sollen die vielen tollen Kolleginnen und Kollegen, die mich in meiner bisherigen Zeit am LFM begleitet haben. Stellvertretend hervorheben möchte ich hierbei Herrn Dr.-Ing. Oltmann Riemer und Herrn Dipl.-Wi.-Ing. Axel Meier, bei denen ich mich insbesondere für die kritische Durchsicht meines Manuskriptes und den daraus entstandenen Verbesserungsvorschlägen bedanken möchte. Allen Teilnehmern der zahlreichen Kaffeerrunden danke ich zudem für den dort stattfindenden wissenschaftlichen (sic!) und nicht-wissenschaftlichen Diskurs.

Ohne entsprechende Unterstützung wäre es mir unmöglich gewesen, meine Überlegungen für die Modifikationen des Versuchsaufbaus zum Mikroschneiden in die Tat umzusetzen. Daher möchte ich mich bei den technischen Mitarbeitern

des LFM, allen voran bei Frau Dipl.-Ing. (FH) Mechthild Schröder, Herrn Horst Kosenski und Herrn Frank Karstens für ihre Unterstützung bedanken.

Meinen studentischen Hilfskräften, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeitern bin ich zu großem Dank verpflichtet, da ich ohne ihre Hilfe das umfangreiche Versuchsprogramm dieser Arbeit nie hätte bewältigen können. In alphabetischer Reihenfolge sind dies Herr B. Sc. Timo Bäumler, Herr B. Sc. Philipp Bremer, Herr B. Sc. Thorben Kriews, Herr M. Sc. Benedikt Palmowski, Herr Dipl.-Ing. Tao Lan und Frau B. Sc. Nina Wurzler.

Weiterhin danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung meiner Arbeit im Rahmen des SFB/TR4 sowie Herrn Hans-Erich Gubela jun. und Herrn Dipl.-Ing. Simon Weingärtner von der IMOS Gubela GmbH für die gute Zusammenarbeit in unserem gemeinsamen Transferprojekt und insbesondere für die Abformung und Funktionsprüfung der von mir hergestellten Funktionsflächen.

Meiner Freundin Frau M. Sc. Melanie Willert danke ich für ihre fortwährende Unterstützung sowie für das Finden und Beseitigen fast aller orthographischen Fehler in meinen Manuskripten! Obwohl sie von Anfang bis Ende mitbekommen hat, welche Arbeit und Anstrengungen mit einer Promotion verbunden sind, konnte ich sie nicht davon abbringen, dasselbe Ziel anzustreben. Ich wünsche ihr für dieses Vorhaben das gleiche Maß an Glück und Erfolg, dass auch mir vergönnt war.

Meinen Eltern kann ich gar nicht genug danken. Sie haben mir ohne Zögern mein gesamtes Studium finanziert, mich in jeder Lebenslage vorbehaltlos unterstützt und gefördert und mich so zu dem gemacht was ich heute bin.

Bremen im Februar 2014

Lars Schönemann

Kurzfassung

Die Herstellung von Mikrostrukturen als Funktionselement auf optischen Bauteilen hat in den vergangenen Jahren stetig an Bedeutung gewonnen. Insbesondere die Herstellung von Formeinsätzen zur Replikation von miniaturisierten Prismenstrukturen, wie sie beispielsweise für hochgenaue Retroreflektoren Anwendung finden, stellt eine besondere Herausforderung dar, da in diesem Fall etablierte ultrapräzise Fertigungsverfahren wie Drehen, Formstoßen oder Fräsen wegen der zugrunde liegenden Bearbeitungskinematik nicht angewendet werden können. Das im Labor für Mikrozerspanung entwickelte ultrapräzise Fertigungsverfahren „Mikroschneiden“ schließt diese Lücke. Durch eine neuartige Verfahrenskinetik und speziell angepasste Diamantwerkzeuge ermöglicht es die Herstellung räumlich begrenzter Mikrostrukturen mit diskontinuierlicher Geometrie in optischer Qualität.

Im Rahmen dieser Dissertationsschrift wurde das „Mikroschneiden“ auf seine Verfahrensgrenzen hin untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die bisherigen Erkenntnisse für kontinuierliche Strukturen (V-Gräben) bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und Spannungsdicken auch auf die Herstellung von diskontinuierlichen Strukturen (Kavitäten) übertragbar sind. Die Grenzen des Fertigungsverfahrens in Bezug auf die herstellbare Strukturgröße und die erreichbare Genauigkeit wurden anhand von Modellierungsansätzen abgeschätzt und in praktischen Experimenten verifiziert.

Neben dem Skalierungsverhalten einer einzelnen Struktur wurde auch die Fertigung großer Funktionsflächen untersucht. Der begrenzende Faktor in diesem Zusammenhang ist die zur Herstellung erforderliche Bearbeitungszeit. Während die Anwendung hoher Schnittgeschwindigkeiten aufgrund des unstetigen Werkzeugpfades zu einem Aufschwingen der Maschine und damit zu einer Verschlechterung der Strukturqualität führt, lässt sich durch eine Anpassung und Optimierung der Verfahrenskinetik ein beträchtlicher Zeitgewinn in der Herstellung großflächig strukturierter Mikrooptiken erreichen. Nach einer systematischen Analyse der Einflussfaktoren auf die Bearbeitungszeit wurden verschiedene Strategien zur Beschleunigung erarbeitet, in einer CAD/CAM-Software umgesetzt und ihre Wirksamkeit exemplarisch anhand der Herstellung großflächiger Anordnungen prismatischer Mikrostrukturen demonstriert.

Inhaltsverzeichnis

Definitionen	XI
Begriffe	XI
Abkürzungen	XII
Formelzeichen	XIV
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	5
2.1 Stand der Technik	5
2.1.1 Anwendungsfelder optischer Mikrostrukturen	5
2.1.2 Herstellung optischer Mikrostrukturen	8
2.1.3 Werkstoffspektrum der Diamantbearbeitung	19
2.1.4 Messung optischer Oberflächen und Mikrostrukturen	24
2.2 Stand der Forschung	28
2.2.1 Spanbildung an duktilen Werkstoffen	28
2.2.2 Verschleiß von Diamantwerkzeugen	30
2.2.3 Skalierung und Grenzen spanender Fertigungsverfahren	32
2.2.4 Mikroschneiden	34
2.3 Fazit zum Stand der Kenntnisse	39
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	41
4 Versuchsumfeld	45
4.1 Fertigungsmittel	45
4.1.1 Experimenteller Aufbau zum Mikroschneiden	45
4.1.2 Werkzeuge	47
4.1.3 Werkstoffe und Werkstückgeometrie	48
4.2 Referenzstrukturen	51
4.2.1 Basisgeometrien	51
4.2.2 Überlagerte diskontinuierliche Strukturen	52
4.2.3 Spanungsquerschnitt diskontinuierlicher Strukturen	53
4.3 CAD/CAM-Systeme	55
4.4 Messmittel und -methoden	58
4.4.1 Einrichtung und Überwachung des Bearbeitungsprozesses	58

4.4.2	Charakterisierung der Oberflächenfeingestalt	60
4.4.3	Beurteilung der Strukturgeometrie	63
4.4.4	Überwachung der Werkzeugbelastung und des Werkzeugverschleißzustandes	65
4.4.5	Beurteilung der optischen Funktion	68
5	Modellierung des Mikroschneidens zur Abschätzung theoretischer Verfahrensgrenzen	69
5.1	Kinematische Grenzen fünfschiger Werkzeugmaschinen	69
5.1.1	Einfluss der Rotationsachsen	70
5.1.2	Einfluss des maximalen Verfahrenswegs der Linearachsen	74
5.2	Einschränkungen aufgrund der verwendeten Werkzeuggeometrie	75
5.3	Modellierung der justierabhängigen Einflussfaktoren auf die Strukturgeometrie	77
5.3.1	Differenz zwischen Strukturwinkel und Anstellwinkel des Werkzeugs	77
5.3.2	Versatz der Werkzeugspitze zur Werkstückoberfläche	79
5.3.3	Versatz zwischen der Werkzeugspitze und der Rotationsachse des Werkstücks	80
5.3.4	Einfluss des Werkzeugspitzenradius auf die Strukturgeometrie	82
5.3.5	Überlagerung mehrerer Abweichungen und Strukturen	82
5.4	Hierarchie der Justierabweichungen und Methoden zur Steigerung der Einrichtgenauigkeit	84
5.4.1	Einstellung deterministischer Strukturwinkel	84
5.4.2	Vertikale und laterale Werkzeugeinrichtung	88
5.5	Schlussfolgerungen	92
6	Deterministische Erzeugung diskontinuierlicher Einzelstrukturen	93
6.1	Spanbildungsvorgang	93
6.2	Zerspankräfte in Abhängigkeit von der Strukturgröße	97
6.2.1	Einfluss der Strukturgeometrie	97
6.2.2	Einfluss der Spannungsbreite	99
6.2.3	Einfluss der Spannungsdicke	101
6.2.4	Einfluss der Schnittgeschwindigkeit	103
6.2.5	Einfluss der Kühlschmierung	104
6.3	Prozess- und materialabhängige Beeinflussung der Form und Funktionsflächen	105
6.4	Vergleich der erzielbaren Oberflächenfeingestalt	107
6.4.1	Einfluss der Strukturgröße	107

6.4.2	Einfluss der Prozessparameter	108
6.4.3	Einfluss der Strukturgeometrie	109
6.5	Einfluss des dynamischen Verhaltens der Werkzeugmaschine	111
6.6	Schlussfolgerungen	118
7	Herstellung großer Funktionsflächen	121
7.1	Grundlagen zur Herstellung kubischer Retroreflektoren	121
7.2	Abschätzung der Bearbeitungszeit für kubische Retroreflektoren	123
7.2.1	Einfluss von Strukturgröße und strukturierter Fläche	125
7.2.2	Auswirkung von Spannungsdicke und Schnittgeschwindigkeit	127
7.3	Werkzeugverschleiß bei der Bearbeitung großer Funktionsflächen	128
7.3.1	Untersuchungen an Grabenstrukturen	128
7.3.2	Verschleiß bei diskontinuierlichen Strukturen	131
7.4	Strategien zur Bearbeitung großer Funktionsflächen	133
7.4.1	Verringerung der Bearbeitungszeit durch Optimierung der Schnittkinematik	133
7.4.2	In-Prozess-Werkzeugwechsel	135
7.4.3	Verwendung speziell angepasster Diamantwerkzeuge	136
7.5	Schlussfolgerungen	138
8	Anwendung des Mikroschneidens zur Herstellung optischer Bauteile	139
8.1	Hergestellte Formeinsätze	139
8.2	Replizierte Kunststoffoptiken	141
8.3	Bewertung der optischen Funktion	142
8.4	Aufnahme von Beugungsbildern	144
8.5	Schlussfolgerungen	146
9	Zusammenfassung und Ausblick	147
9.1	Verfahrensgrenzen beim Mikroschneiden optischer Funktionsflächen	147
9.2	Ausblick	148
	Literatur	151
	Liste studentischer Arbeiten	169