

Peiran Zhang

Qualitätsregelungssystem eines laser-chemischen Ätzprozesses für die metallische Mikroproduktion

Band 1



**SHAKER
VERLAG**

Bremer Institut für
Messtechnik, Automatisierung
und Qualitätswissenschaft

Qualitätsregelungssystem eines laser-chemischen Ätzprozesses für die metallische Mikroproduktion

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Peiran Zhang

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer

Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament, Universität Augsburg

Tag der mündlichen Prüfung: 13. März 2018

Forschungsberichte des Bremer Instituts für Messtechnik,
Automatisierung und Qualitätswissenschaft

Band 1

Peiran Zhang

**Qualitätsregelungssystem eines laser-chemischen
Ätzprozesses für die metallische Mikroproduktion**

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 978-3-8440-5980-9

ISSN 2570-2491

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Zeit von 08.2009 bis 12.2016 am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) im Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen.

Sie entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 747 „Mikrokaltumformen“, Teilprojekt A5 „Laserkontur“. Ich bedanke mich zuerst bei der Deutsche Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts. Allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe möchte ich ein herzliches Dankschön für die Kooperationen und das freundliche Arbeitsklima aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer für die Möglichkeit, diese Arbeit unter seiner Betreuung anzufertigen. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen, wissenschaftliche und methodische Unterstützungen habe ich von ihm bekommen. Ich danke auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament für die fachlichen Hinweise und die Begutachtung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gert Goch möchte ich danken, dass er mir die Gelegenheit bot, auf diesem sehr interessanten Forschungsgebiet unter hervorragenden Arbeitsbedingungen tätig zu sein, und die zahlreichen Hinweise und Anregungen für die Arbeit gab.

Mein besonderer Dank gilt auch Herren Axel v. Freyberg und Volker Renken für die fachlichen als auch persönlichen Unterstützungen. Ich danke auch Herrn Dr.-Ing. Gerald Ströbel, Herrn Dr.-Ing. Dirk Stöbener, Herrn Dr.-Ing. Stefan Patzelt und Herren Matthias Auerswald, Merlin Mikulewitsch, Jan Osmers für die Durchsicht der Arbeit sowie für die wertvollen Vorschläge.

Für die Unterstützung zur Durchführung von experimentellen Untersuchungen in dem Bremer Institut für angewandte Strahltechnik danke ich Herrn Salar Mehrafsun und Frau Olga Hauser ganz herzlich.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern vom BIMAQ bin ich sehr dankbar für die angenehme Zusammenarbeit.

Schließlich danke ich ganz herzlich meinem Mann Zongzhi Zhao und meinen Eltern für die großartigen und vielfältigen Unterstützungen in den letzten Jahren.

Peiran Zhang

Tettnang, 09.2017

Kurzfassung	I
Symbolliste	III
Abkürzung	VI
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit.....	3
2 Stand der Forschung.....	7
2.1 Laserinduzierter chemischer Ätzprozess	7
2.1.1 LCM-Funktionsweise und Mechanismen	8
2.1.2 Einflüsse von Prozessparametern auf die Abtragsgeometrie.....	9
2.2 Qualitätsregelung.....	10
2.2.1 Regelungskonzepte für den nichtlinearen MIMO- Prozess.....	11
2.2.2 Regler für den zeitvarianten Prozess	12
2.2.3 Qualitätsregelungskonzept für die Prozesskette	13
2.2.4 Regler für die zeitdiskrete Regelung	16
2.3 Messtechnik	17
2.4 Zusammenfassung Stand der Forschung.....	18
3 Versuchsaufbau und Automatisierung für LCM	21
4 Regelungsstrategie	27
4.1 Struktur des Regelungssystems.....	27
4.2 Produktionsdiskretes Qualitätsregelungskonzept	30
4.3 Prozessnahes Qualitätsregelungskonzept	33
4.4 In-Prozess Qualitätsregelungskonzept	34
4.5 Fazit des Kapitels	37
5 Charakterisierung der Abtragsgeometrie	39
5.1 Vereinfachung der Abtragsgeometrie in Abtragskontur	39
5.2 Qualitätsmerkmale des Einzelabtragsprozesses	40
5.2.1 Gaußanpassung für den LCM-Abtrag im Querschnitt	41
5.2.1.1 Versuchsmatrix	41
5.2.1.2 Auswertung der Versuchen	43

5.2.2	Zuverlässigkeitsuntersuchung der Gaußanpassung	46
5.2.3	Annäherung der Abtragskontur durch modifizierte Gaußfunktion	47
5.2.4	Prozessparameter zum Erzeugen des gaußförmigen Abtrags	50
5.2.5	Erzielbare Formparameter innerhalb des LCM- Prozessfensters	54
5.3	Qualitätsmerkmale eines Bauteils	56
5.4	Fazit des Kapitels	58
6	Modellierung des einzelnen Abtragsprozesses	61
6.1	Architektur vom RBF-Netzwerk	61
6.2	RBF-Modell für einzelnen LCM-Abtragsprozess	63
6.3	Validierung des auf RBF-Netzwerk basierten Prozessmodells	68
6.4	Adaptives Prozessmodell	70
6.5	Fazit des Kapitels	71
7	Modellierung und Simulation der LCM-Prozesskette	73
7.1	Theoretische Überlagerung der Abtragsbahnen	73
7.2	Wechselwirkungen zwischen überlappenden Abtragsbahnen	75
7.2.1	Winkelabhängiger Flankeneinfluss	78
7.2.2	Einflüsse von verbleibender thermischer Energie der vorherigen Abtragsbahn	84
7.3	Abtrag von Kante oder Flanke	86
7.4	Fazit des Kapitels	89
8	Produktionsdiskrete Qualitätsregelung für den LCM	91
8.1	Entwicklung der produktionsdiskreten Regelung	91
8.1.1	Bahnplanung im 2D Querschnitt	92
8.1.2	Inverses Prozessmodell	94
8.1.3	Beobachter	95
8.1.4	Adaptiver Regler	95
8.1.4.1	Reglerentwurf	96
8.1.4.2	Verifizierung der Regler	97
8.2	Herstellung eines viereckigen Gesenks mit der produktionsdiskreten Regelung	99
8.2.1	Herstellung des viereckigen Gesenks	101

8.3	Herstellung einer Kantenrundung mit der produktionsdiskreten Regelung	104
8.3.1	Bahnplanung für die Kantenrundung	104
8.3.2	Herstellung der Kantenrundung	106
8.4	Fazit des Kapitels	108
9	Zusammenfassung und Ausblick	111
9.1	Zusammenfassung	111
9.2	Ausblick	114
9.2.1	Prozessnahe Qualitätsregelung.....	114
9.2.2	In-Prozess Qualitätsregelung	117
Anhang 1 Versuchsmatrix und Ergebnisse		123
Literatur		129
Eigene Veröffentlichung		135

Kurzfassung

Der laserinduzierte chemische Ätzprozess (*engl.: laser chemical machining, LCM*) ist ein neues Verfahren zur Oberflächenstrukturierung von Werkzeugmetallen mit hohem Härtegrad. Ein fokussierter Laserstrahl erwärmt hierbei die Oberfläche des in einem Ätzmittel befindlichen Bauteils und aktiviert einen lokalen Materialabtrag durch eine chemische Reaktion. Als Qualitätsmerkmale für den LCM-Prozess werden die Maß- und Formabweichungen der resultierten Geometrie betrachtet, die sich durch die Anpassung der Prozessparameter wie z.B. der Laserleistung, der Vorschubgeschwindigkeit des Materials und der Durchflussmenge des Ätzmittels steuern lassen. Zur Erhöhung der Prozessgenauigkeit und -stabilität sowie zur Reduzierung des Entwicklungsaufwands wird für das LCM erstmals ein Qualitätsregelungssystem entworfen und angewendet. Die Charakterisierung der Qualitätsmerkmale, die Entwicklung einer modellbasierten Prozessvorhersage, der Entwurf eines Qualitätsreglers und die Evaluierung der erfassten Geometrie sind die Schwerpunkte dieser Arbeit.

Bei der LCM-Produktion entsteht eine komplexe Bauteilgeometrie durch mehrere einzelne Abtragsprozesse. Jeder Abtragsprozess entspricht einer Abtragsbahn und wird als ein Prozess der Prozesskette betrachtet. Die Herausforderungen zur Beherrschung der LCM-Produktion sind einerseits die Modellierung einzelner nichtlinearer Abtragsprozesse und andererseits die Simulation der gesamten Prozesskette unter Berücksichtigung der Überlagerung der Abtragsbahnen. Aufgrund der Interaktionen zwischen den Teilsystemen der LCM-Anlage, wie der mechanischen Positionierungseinheit, der Ätzmittelpumpe, der Laserquelle und den optischen Komponenten, sowie auf Grund der Wechselwirkungen zwischen den Abtragsbahnen, ist die Genauigkeit der modellbasierten Vorhersagen der LCM-Produktion begrenzt. Um die Simulationsabweichung zu kompensieren, wird ein Qualitätsregelungssystem bestehend aus einer produktionsdiskreten, einer prozessnahen und einer in-Prozess Regelung untersucht.

Die produktionsdiskrete Regelung stellt den Schwerpunkt der Arbeit dar und wird basierend auf einer vorhandenen post-Produktion-Messung der Bauteilgeometrie realisiert. Dabei wird die hergestellte Bauteilgeometrie erst nach der Produktion gemessen und mit der vorgegebenen Sollgeometrie verglichen. Entsprechend der Abweichungen bezüglich der Sollgeometrie adaptiert der Qualitätsregler die Prozessparameter für nachfolgende Produktionen. Somit wird die Bauteilgeometrie während der Produktionskette stetig optimiert. Dieser produktionsdiskrete Regelungsansatz wird anhand der Herstellung eines viereckigen Gesenks erprobt. Damit konnte bereits nach zwei Optimierungszyklen die Maßabweichung der Gesenktiefe von 33,1 μm auf 2,4 μm reduziert werden.

Eine prozessnahe Regelung mit einer in-situ Messung nach jeder Abtragsbahn ermöglicht es, die aus den vorherigen Bahnen resultierenden Qualitätsabweichungen durch die Adaption der nachfolgenden Bahnen zu kompensieren. Darüber hinaus bietet eine Geometrieerfassung während der Bearbeitung schließlich die Möglichkeit einer in-Prozess Qualitätsregelung, die bereits während der Fertigung einer Abtragsbahn eingreift. Die prozessnahe und in-Prozess Regelung werden in dieser Arbeit ausblickend konzipiert und könnten in naher Zukunft mit einer noch zu entwickelnden Messtechnik getestet werden.

Mit der entwickelten produktionsdiskreten Qualitätsregelung konnte Anzahl der Bearbeitungszyklen bei der Anlaufphase für die präzise Herstellung einer neuen Geometrie mit vorgegebenen Fertigungstoleranz bis $5\text{ }\mu\text{m}$ von mehr als 10 auf 2-3 reduziert werden. Folglich lässt sich mit der Qualitätsregelung der Herstellungsaufwand für Mikrowerkzeuge, die meistens als Einzelstücke oder in kleiner Stückzahl gefertigt werden, stark reduzieren. Eine noch höhere Fertigungsgenauigkeit könnte perspektivisch durch die konzipierte prozessnahe und in-Prozess Regelung realisiert werden.

Symbolliste

A	Formparametermatrix aller Abtragsbahnen der LCM-Prozesskette;
a	Formparametervektor der einzelnen Abtragsbahn im Querschnitt
a_1	Abtragstiefe als Komponente der Formparametervektor
a_2	Abtragsbreite als Komponente der Formparametervektor
$a_{1,ober}$	Obergrenze der Abtragstiefe der einzelnen Abtragsbahn
$a_{1,unter}$	Untergrenze der Abtragstiefe der einzelnen Abtragsbahn
$a_{2,ober}$	Obergrenze der Abtragsbreite der einzelnen Abtragsbahn
$a_{2,unter}$	Untergrenze der Abtragsbreite der einzelnen Abtragsbahn
B	Breite der erzeugten Endkontur
c	Vektor der Mittelposition von Basisfunktionen
d	Euklidischen Abstand
D	Fokusbildung des Laserstrahls
e	Regelabweichung
G_{anp}	Ausgewertete Abtragskontur aus der Gaußanpassung
G_{gaus}	Gaußförmiger Abtrag vom einzelnen Prozess (Abtragsbahn)
G_{init}	Initiale Kontur des Bauteils im Querschnitt
G_{mess}	Messkontur des hergestellten Bauteils im Querschnitt
G_{sim}	Simulierte Abtragsgeometrie der LCM-Prozesskette
G_{soll}	Sollkontur des Bauteils im Querschnitt
G_{zwis}	Die in-situ gemessene Bauteilkontur im Querschnitt
H_{LCM}	Modellfunktion des einzelnen Abtragsprozesses
H_{Modell}	Funktion des RBF-Abtragsmodells

H_{pseu}	Modellfunktion der pseudolinearen Regelstrecke
IH_{Modell}	Inverses Abtragsmodell
i	Folgenummer der Produktion (Prozesskette)
j	Folgenummer der Abtragsbahn (Prozess)
K_I	Verstärkungsfaktor des zeitdiskreten I-Reglers
l	Strecklänge einer Bearbeitung in der Vorschubrichtung
N_{bahn}	Anzahl der Abtragsbahnen
N_{RBF}	Anzahl der Basisfunktionen (Neuron) vom RBF-Prozessmodell
p	Laserleistung
Q	Durchflussmenge des Ätzmittels
R_a	Mittenrauheit
R_z	Rauheitsspitze
T	Tiefe der erzeugten Endkontur
U	Prozessparametermatrix von LCM-Prozesskette
u	Stellgrößen / Prozessparametervektor vom einzelnen Abtragsprozess
v	Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeuggestisches
w	Führungsgrößen
X_0	Positionsparameter aller Abtragsbahnen der LCM-Prozesskette
x_0	Positionsparameter der einzelnen Abtragsbahn
x	Zustellrichtung (Laterale Richtung im Querschnitt)
y	Vorschubrichtung des Materials
z	Abtragsrichtung (Vertikale Richtung parallel zum Laserstrahl)
θ	Deformationskoeffizient für eine modifizierte Gaußanpassung in Abtragskontur

η	Änderungsrate der Formparameter aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den überlappenden Abtragsprozessen
σ	Radien der Basisfunktion

Abkürzung

LCM	Laserinduzierter chemische Ätzprozess
μ ECM	Elektrochemische Mikrobearbeitung
GUI	Bedienoberfläche
JECM	Elektrolyten Jet Bearbeitung
μ EDM	Mikrofunkenerosion
HRC	Skala C von Härte nach Rockwell
MIMO	Mehrgrößenprozess, <i>engl.: multiple inputs multiple outputs</i>
RMSE	Quadratwurzel der mittleren quadratischen Abweichung, <i>engl.: root-mean-square error</i>
SISO	Eingrößensystem, <i>engl.: single input single output</i>
SLM	Selektives Laserschmelzen
LZI	Lineares zeitinvariantes System
KNN	Künstliches neuronales Netzwerk
RBF	Radiale Basisfunktion