wbk
Institut für Produktionstechnik

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 172

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1852-3
ISSN 0724-4967

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

wbk
Institut für Produktionstechnik

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Christoph Ruhs

aus Lörrach

Tag der mündlichen Prüfung:	22.02.2013
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Korreferent:	Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

KIT
Karlsruher Institut für Technologie

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

An erster Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für die Übernahme des Hauptreferats bedanken. Während meiner Zeit am wbk hat er durch seine Anregungen maßgebliche Impulse für das Gelingen meiner Untersuchungen gegeben. Zudem bedanke ich mich für die Förderung und das mir entgegengebrachte Vertrauen, das entscheidend zu meiner beruflichen Entwicklung beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann danke ich für die Übernahme des Korreferats, das entgegengebrachte Interesse und die fachkundige Durchsicht meiner Arbeit.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei allen Mitarbeitern des wbk. Die hervorragende Arbeitsatmosphäre und Kollegialität habe ich immer zu schätzen gewusst. Ganz besonders danke ich Herrn Rolf Philipps für die gemeinsame Zeit an den Erodiermaschinen. Neben dem wissenschaftlichen Arbeiten habe ich auch immer die teilweise fachfremden Diskussionen innerhalb der FWT bei diversen gemeinsamen Mittagessen und Kuchenterminen genossen.

Mein Dank gilt zudem den zahlreichen Studien- und Diplomarbeitern sowie wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich während meiner Zeit am wbk unterstützt haben. Ohne sie wäre mir das Anfertigen der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern Johanna Ruhs und Dr. Alexander Ruhs, die mir immer jede erdenkliche Unterstützung und familiären Rückhalt zukommen ließen.

Mein größter Dank gilt meiner lieben Frau Katharina und meiner Tochter Lea. Sie haben mich durch den steinigen Weg des Promotionsprozesses begleitet. Sie richteten mich auf, wenn ich auf dem Boden lag und holten mich auf den Boden der Tatsachen zurück, wenn es nötig war. Aus diesem Grund widme ich ihnen diese Arbeit.

Rastatt, im März 2013 Christoph Ruhs

Abstract

During the last decades Microsystem Technology has established itself as a technology needed by many different industrial sectors. Due to further development of the functionality of products and the increase of products power density the demand for suitable manufacturing techniques for the mass production of mechanical micro parts grows. For this application commonly forming processes are used to realize a high out-put at a low unit cost. For this kind of technologies, like powder injection moulding or micro moulding, high quality micro moulds made of wear resistant materials are needed. Micro Electrical Discharge Machining (micro EDM) is an established manufacturing process because, based on the thermal material removal mechanism, a high level of accuracy during the machining of hard materials can be reached. The most flexible process variant of the micro EDM process is micro EDM-milling because when using this technique the geometry of a cavity is defined by a NC-Code. Therefore there is no need for the manufacturing of form electrodes.

The efficiency of a production process when using micro EDM-milling is mainly influenced by the workload of preparation activities and the quality insurance after the actual manufacturing procedure. So the main goal is to manufacture a good part by the first attempt.

Along the whole approach for the manufacturing of micro cavities the biggest challenges are the time-consuming investigation of the process parameters for the erosion process and the infeed of the electrode as well as the correct compensation of the electrode wear. For the wear compensation many different controllers have been developed and tested. But until now, there is no concept which guarantees a reliable manufacturing process, so a separate quality control is needed afterwards.

In this work an automated process sequence for the manufacturing of micro cavities using micro EDM-milling is developed, based on the described challenges. Starting with the development of an automated parameter search using DOE-methods and a non-linear regression, the infeed and the lateral feed rate of the tool electrode were optimized for the manufacturing of 2,5D-cavities to guarantee high accuracy and low surface roughness on sloping walls. The last step of the developed sequence is a process control for the micro EDM-milling process. After the manufacturing process the work piece is measured by a confocal white-light sensor directly on the EDM-machine and can be reworked automatically without unclamping. This iterative procedure provides a reliable manufacturing of micro moulds with strict tolerances at the first attempt.

Kurzfassung

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Mikrosystemtechnik als eine branchenübergreifende Technologie etabliert. Bedingt durch die Weiterentwicklung von Produkten aus unterschiedlichsten Bereichen und die kontinuierliche Erhöhung ihrer Leistungsdichte steigt der Bedarf an massentauglichen Produktionstechnologien für die Herstellung von kleinsten mechanischen Bauteilen. Um diesem Trend gerecht zu werden, bieten sich vorwiegend urformende Verfahren an, mit denen eine hohe Ausbringung bei geringen Stückkosten erreicht werden kann. Für diese Technologien, wie das Pulverspritzgießen oder der Mikroguss, ist es erforderlich Mikroformwerkzeuge in hoher Güte und aus verschleißfesten Materialien herzustellen. Die Mikrofunkenerosion ist dafür ein etabliertes Verfahren, da hier, bedingt durch den thermischen Abtragsprozess, Kavitäten mit kleinen Toleranzen in harte Materialien eingebracht werden können. Die flexibelste Prozessvariante ist die Mikrobahnerosion, da hier die Geometrie mittels eines NC-Codes erzeugt wird und damit keine Formelektrodenherstellung erforderlich ist.

Die Effizienz einer Formeinsatzfertigung mittels Mikrobahnerosion ist maßgeblich durch den Umfang arbeitsvorbereitender Maßnahmen und die Sicherstellung der Qualität bestimmt. Die Zielsetzung dabei ist, bei dem ersten Fertigungsanlauf ein Gutteil im geforderten Toleranzbereich und mit hinreichender Oberflächengüte zu erzeugen.

Bei dem gesamten Prozess der Formerstellung sind die größten Herausforderungen die meist aufwändige Erarbeitung der Erosionsparameter und der kinematischen Größen sowie die korrekte Kompensation des Elektrodenverschleißes. Für letztere Aufgabe wurden bereits verschiedene Reglerkonzepte entwickelt und im mikrobahnerosiven Prozess eingesetzt, jedoch ist durch keinen eine nachweislich prozesssichere Fertigung möglich und damit eine anschließende Qualitätssicherung erforderlich.

Aufbauend auf den beschriebenen Herausforderungen wurde innerhalb dieser Arbeit eine automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion entwickelt. Ausgehend von einer automatisiert ablaufenden Parametersuche geeigneter Prozessgrößen basierend auf DOE-Methoden und einer nichtlinearen Regression wurden optimierte kinematische Parameter für die Fertigung von schrägen Wänden in 2,5D-Kavitäten erarbeitet, um eine hohe und homogene Oberflächengüte an den Wänden einer Kavität zu erzeugen. Der letzte Schritt der entwickelten Vorgehensweise stellt eine prozessübergreifende Abtragsregelung dar. Bei diesem abschließenden Schritt wird das Fertigungsergebnis direkt an der Mikrofunkenerosionsmaschine mit einem nach dem konfokalen Prinzip arbeitenden Sensor gemessen und automatisiert eine Nachbearbeitung bei derselben Einspannung des Werkstücks eingeleitet. Durch diese iterativ stattfindende Qualitätskontrolle direkt an der Werkzeugmaschine kann das Einhalten engster Toleranzfelder und damit eine prozesssichere Herstellung von Kavitäten gewährleistet werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungen IV

Formelzeichen V

1 Einleitung und Zielsetzung 1

2 Kenntnisstand 4

2.1 Mikrofunkenerosion 4

2.2 Ausgewählte Prozessvarianten 8

2.2.1 Mikrosenkerosion 8

2.2.2 Mikrobahnerosion 10

2.3 Zusammenfassung und Fazit 20

3 Versuchsstand und Methodik 22

3.1 Elektrodenmaterial und Dielektrikum 22

3.1.1 Werkzeugelektrode 22

3.1.2 Werkstückelektrode 22

3.1.3 Dielektrikum 23

3.2 Probenherstellung 23

3.2.1 Mikrofunkenerodiermaschine 23

3.2.2 Integrierter konfokaler Weißlichtsensor 26

3.2.3 Erfassung der Erosionsparameter 29

3.3 Probenbewertung 29

3.3.1 Lichtmikroskopische Messungen 29

3.3.2 Konfokale Weißlichtmikroskopie 30

3.3.3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen 30

3.4 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung 30

3.4.1 Auswahl der geeigneten DOE-Methode 31

3.4.2 Zentral zusammengesetzter Versuchsplan 33

3.5 Nichtlineare Regression 36

4 Automatisierte Parametersuche 37
4.1 Auswahl der zu beurteilenden Ergebnisgröße 38
4.2 Auswahl der betrachteten Prozessparameter 38
4.3 Definition einer Testgeometrie 41
4.4 Implementierung einer automatisierten Parametersuche 42
4.4.1 Vorgehensweise bei der Parametersuche 43
4.4.2 Mathematische Auswertung der Messergebnisse 47
4.5 Validierung 49
4.6 Fazit 52

5 Optimierte Zustellwerte für die Bearbeitung von 2,5D-Kavitäten 53
5.1 Versuchsdurchführung 54
5.1.1 Probengeometrie und -herstellung 54
5.1.2 Korrekturfaktor für die Verschleißkompensation 55
5.1.3 Messdatenerfassung und -auswertung 55
5.2 Schruppbearbeitung von schrägen Wänden 56
5.2.1 Einfluss auf die Oberflächenrauheit 57
5.2.2 Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode 59
5.2.3 Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel 61
5.3 Schlichtbearbeitung von schrägen Wänden 61
5.3.1 Einfluss auf die Oberflächenrauheit 62
5.3.2 Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode 64
5.3.3 Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel 66
5.4 Feinschlichtbearbeitung von schrägen Wänden 66
5.4.1 Einfluss auf die Oberflächenrauheit 67
5.4.2 Einfluss auf den Kantenradius der Werkzeugelektrode 69
5.4.3 Einfluss der Zustellung auf den Wandwinkel 70
5.5 Regressionsfunktionen 71
5.6 Validierung an einer sphärischen Geometrie 72
5.7 Optimierte Vorschubgeschwindigkeiten 74
5.7.1 Schruppen 76
5.7.2 Schlichten 78
5.8 Fazit 79

6 Prozessübergreifende Abtragsregelung 82
6.1 Kategorisierung der Geometrieabweichungen 83
6.1.1 Abweichung von der Solltiefe 83
6.1.2 Fehlerhafte Oberflächenausprägung 84
6.2 Definition von Testkavitäten 87
6.3 Vorgehensweise bei der Abtragsregelung 88
6.3.1 Messung und Weiterbearbeitung der gefertigten Tiefe 91
6.3.2 Messung und Weiterbearbeitung fehlerhafter Oberflächenausprägungen 93
6.4 Implementierung einer NC-Code-basierten Abtragsregelung 95
6.4.1 Modul 1: Regelungseinstellungen 95
6.4.2 Modul 2: Datenauswertung Tiefe 98
6.4.3 Modul 3: Datenauswertung Oberfläche 99
6.4.4 Modul 4: Weiterbearbeitungsprogramme 100
6.4.5 Ablauf der Abtragsregelung 101
6.5 Validierung der Abtragsregelung 103
6.5.1 Validierung an einer 2,5D-Testgeometrie 103
6.5.2 Validierung an einer sphärischen Geometrie 106
6.6 Fazit 109

7 Zusammenfassung und Ausblick 110
7.1 Zusammenfassung 110
7.2 Ausblick 112

Literaturverzeichnis I

Abkürzungen

Kurzzeichen	Begriff
2,5D	2,5-dimensional
3D	dreidimensional
BDD	Buffered Digital Differential
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAS	Computer Algebra System
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOE	Design Of Experiment
ECM	Electro Chemical Machining
EDM	Electrical Discharge Machining
FK	Faktorkombination
FWW	Faktorwechselwirkung
fsolve	Mathematischer Ansatz mittels „floating-point arithmetic“
HM	Hartmetall
HV	Härte nach Vickers
NWA	Nutzwertanalyse
nD	numerical Differential
REM	Rasterelektronenmikroskop
VSS	Variable Structure System
WEDG	Wire Electrical Discharge Grinding
WS	Werkstück
WZ	Werkzeug

Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
±a	Extremstellen der Faktoren im Sternpunkt	[-]
a_p	Zustelltiefe der Werkzeugelektrode (in Anlehnung an die Zerspanung)	[µm]
$a_{p,cal}$	Berechnete Zustelltiefe der Werkzeugelektrode	[µm]
B	Breite einer Kavität	[µm]
C	Kapazität des Relaxationsgenerators	[F]
D	Durchmesser	[µm]
D_n	Durchmesser der Düsenöffnung	[mm]
f	Freiheitsgrad	[-]
f_a	Abtastfrequenz	[Hz]
f_e	Entladefrequenz	[Hz]
f_o	Ortsfrequenz	[Hz]
f_p	Pulsfrequenz	[Hz]
I	Maschinenparameter für den Entladestrom	[-]
i_e	Entladestrom	[A]
k	Anzahl der Faktoren	[-]
L	Länge einer Kavität	[µm]
L_A	Induktivität im Aufladekreis	[H]
L_e	Induktivität im Entladekreis	[H]
L_F	Größe des Funkenspalts	[µm]
L_{krit}	Kritische Länge des abgeschatteten Bereichs	[µm]
L_s	Messstrecke	[mm]
L_z	Induktivität in der Zuleitung	[H]
MRR	Abtragsrate	[mm^3/min]
p_b	Luftdruck zum Abblasen einer Kavität	[bar]

R_A	Widerstand im Aufladekreis	[Ω]
$\bar{Ra}$	Mittelwert des arithmetischen Mittenrauwerts	[µm]
Ra	Arithmetischer Mittenrauwert	[µm]
Ra_{min}	Kleinster Arithmetischer Mittenrauwert	[µm]
R_e	Widerstand im Entladekreis	[Ω]
R_m	Zugfestigkeit	[MPa]
r	Radius	[mm]
r_k	Kantenradius	[µm]
T	Tiefe der Kavität	[µm]
T_1-T_5	Tiefensegmente einer sphärischen Testkavität	[mm]
T_{ist}	Gemessene Isttiefe	[µm]
T_s	Segmenttiefe	[mm]
T_{soll}	Solltiefe	[µm]
t_0	Pausendauer	[s]
t_b	Zeit zum Abblasen einer Kavität	[s]
t_d	Zündverzögerung	[s]
t_e	Entladedauer	[s]
t_i	Impulsdauer	[s]
t_p	Periodendauer	[s]
u_0	Leerlaufspannung	[V]
u_C	Kondensatorspannung	[V]
u_D	Durchbruchspannung	[V]
u_e	Entladespannung	[V]
v_f	Laterale Vorschubgeschwindigkeit der Werkzeugelektrode	[mm/s]
W_e	Entladeenergie	[J]
W_t	Welligkeitsprofil	[µm]
x_n	Faktoren des Modells	[-]

y	Zielgröße des Modells	[-]
α	Wandwinkel	[°]
α_{mess}	Gemessener Wandwinkel	[°]
β_k	Koeffizienten zur Beschreibung linearer Effekte	[-]
$\overline{\beta}_k$	Mittelwert der Koeffizienten	[-]
β_{kk}	Koeffizienten zur Beschreibung quadratischer Effekte	[-]
ΔMRR	Unterschied der Abtragsrate	[mm^3/min]
$\Delta\overline{R}a$	Unterschied gemittelter arithmetischer Mittenrauwerte	[µm]
Δr_k	Unterschied der Kantenverrundung an der Werkzeugelektrode	[µm]
ΔT	Tiefenabweichung	[µm]
Δz	Messunsicherheit des konfokalen Sensors	[nm]
$\Delta\alpha$	Abweichung vom Wandwinkel	[°]
λ	Wellenlänge	[nm]
λ_{min}	Minimale Grenzwellenlänge	[nm]
λ_{max}	Maximale Grenzwellenlänge	[nm]
ρ	Reflexionsgrad	[%]
φ	Winkel der Anströmung zum Werkstück	[°]