

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

Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels
Analyse akustischer Emissionen bei der
Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 182

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV- Pikosekundenlasern

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Patricia Weber

aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 25.02.2014

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2740-2

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

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

Abstract

Due to its flexible application lasers are used in many innovative areas of industrial production, such as the electronics industry, the automotive industry, the solar sector and medical technology. The non-contact and thus force-free removal of material by laser sublimation allows machining of very hard materials such as steel, tungsten carbide and ceramics, but also sensitive materials like glass or silicon.

Especially in micro manufacturing tolerances are narrow and thus make an automated, controlled and regulated process essential. The integration of sensors and the development of monitoring and control units in the process are an important part of current research and development work.

The aim of this work is to increase the process repeatability by analyzing acoustic emissions during micro laser ablation with UV picosecond lasers. For this, the single-pulse, line, plane and 2½D ablation are investigated. In addition, formation mechanisms of holes on the ground of machined cavities are studied and remedies derived. Based on these new approaches the use of optical and acoustic emissions for focus positioning and control are able to increase the repeatability of the machining quality. An objective evaluation of the focus position towards the workpiece surface is realized by identification of uniform process-relevant criteria in the behavior of the acoustic emission. Furthermore, a specially developed LabVIEW program is implemented which evaluates the data and communicates automatically with the machine control. Thus the focus position is automatically and reproducibly adjusted on the workpiece's surface.

Kurzfassung

Auf Grund seiner flexiblen Einsatzmöglichkeiten findet der Laser als Werkzeug stetigen Einzug in viele innovative Bereiche der industriellen Produktion, wie der Elektronikbranche, der Automobilbranche, dem Solarsektor und der Medizintechnik. Der berührungslose und damit kraftfreie Abtrag mittels Laser erlaubt mittels Sublimation die schädigungsarme Strukturierung sehr harter Materialien, wie Stähle, Hartmetalle und Keramiken, aber auch sensibler Werkstoffe wie Glas und Silizium.

Gerade in der Mikrofertigung sind die einzuhaltenden Toleranzen sehr gering und machen einen automatisierten, kontrollierten und geregelten Prozess unabdingbar. Die Integration von Sensoren und die Entwicklung von Kontroll- und Regelungseinheiten im Prozess sind ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zur Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern zu leisten. Dafür wird das Prozessverständnis für das Verhalten der Laserablation bei variierenden Parametereinstellungen erarbeitet, indem der Einzelpuls-, Bahn-, Flächen- und 2½D-Abtrag untersucht wird. Zudem werden Entstehungsmechanismen von Löchern im Grund der Kavitäten untersucht und Abhilfemaßnahmen abgeleitet. Darauf aufbauend wird mit neuen Ansätzen zur Nutzung optischer und akustischer Prozessemissionen zur Fokuslagenpositionierung und –regelung die Wiederholbarkeit der Bearbeitungsqualität erhöht. Um eine objektive Bewertung der Fokuslage zur Werkstückoberfläche zu erzielen, werden prozessrelevante einheitliche Kriterien im Verhalten der akustischen Emission identifiziert. Dafür wird ein eigens entwickeltes LabVIEW-Programm implementiert, welches selbständig mit der Maschinensteuerung kommuniziert und den Fokus automatisch auf der Werkstückoberfläche positioniert. Mit der Analyse der akustischen Signale lässt sich automatisiert und reproduzierbar die Fokuslage und die Laserleistung einstellen.

Vorwort des Verfassers

Ich bedanke mich bei Prof. Schulze für das entgegengebrachte Vertrauen in Bezug auf meine Tätigkeiten am wbk Institut für Produktionstechnik und die Übernahme des Hauptreferats. Weiterhin möchte ich Prof. Klocke danken für das Interesse an meiner Arbeit, die konstruktiven Anregungen und die Übernahme des Korreferats.

Ein großer Dank gilt meinen Mikrokollegen Christoph Ruhs, Marco Deuchert, Mateusz Chlipala und Philipp Hoppen für die gute Stimmung, das stets offene Ohr und die vielen schönen gemeinsamen Erinnerungen an die ich mich gerne zurückerinnern werde. Mein besonderer Dank gilt Friedbert Matthes für die hervorragende Zusammenarbeit an der Lasermikrobearbeitungsmaschine, die Unterstützung in der Betreuung der Studenten bei konstruktiven Arbeiten, sowie dem großen Engagement bei der Instandhaltung und -setzung des Versuchsstands. Ein Dank gilt auch den wbk- und insbesondere meinen Bürokollegen Dr. Chris Becke und Stefan Klotz sowie den Werkstattkollegen, die mich bei meiner Arbeit moralisch und tatkräftig unterstützt haben. Ich habe stets den Gedankenaustausch zwischen den drei Abteilungen FWT/MAP/PRO des wbks genossen. Vielen Dank auch den Kollegen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vielen Dank Herrn Zibat für seine Unterstützung am Laboratorium für Elektronenmikroskopie, Frau Ohl für die Probenpräparation in der Materialographie und Herrn Dr. Klein für seine Unterstützung bei den Absorptionmessungen am Lichttechnischen Institut.

Ebenfalls danken möchte ich den Studenten, die mich während meiner Arbeit in Form von Studien- und Abschlussarbeiten oder als Hilfswissenschaftler mit größtem Engagement unterstützt haben. Ihr persönliches Interesse hat zu einer sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre in unserem „Laser“-Team beigetragen, weshalb es mir immer eine große Freude war mit Ihnen zusammenzuarbeiten.

Ich danke meinen Eltern und meiner Familie für den Zuspruch, Ihre Unterstützung, die Ausdauer und das „Auf-mich-Stolz-sein“.

Mein größter Dank gilt meinem Freund Thilo, der immer für mich da ist, Verständnis hat, mich auffängt, mir ein Lächeln auf die Lippen zaubert und mir mit seiner Liebe Halt gibt. Danke, dass es dich in meinem Leben gibt.

Patricia Weber

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	III
Formelzeichen	IV
1 Einleitung	1
2 Kenntnisstand	4
2.1 Grundlagen der Mikrolaserstrukturierung mit Ultrakurzpulslasern	4
2.1.1 Strahlformung für die Mikrostrukturierung	4
2.1.2 Absorption und Laser-Material-Wechselwirkung	8
2.1.3 Prozessemissionen	11
2.1.4 Prozessparameter	13
2.2 Stand der Technik zur Lasermikrostrukturierung mit gepulsten Lasern	15
2.2.1 Abtragen mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich	16
2.2.2 Abtragen mit Pulsdauern im Pikosekundenbereich	17
2.2.3 Abtragen mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich	17
2.2.4 Löcher im Abtragergebnis	19
2.3 Stand der Technik zur Fokusbildungsüberwachung beim Laserabtragen	21
2.3.1 Fokusbildungsüberwachung mit unabhängig vom Abtragprozess messenden Sensoren	23
2.3.2 Fokusbildungsüberwachung durch Erfassung von Prozessemissionen	24
3 Zielsetzung und eigener Ansatz	34
4 Versuchseinrichtung und -methodik	36
4.1 Laserbearbeitungsanlage und integrierte Sensortechnik	36
4.2 Verwendete Werkstoffe	41
4.3 Probentopographie und Absorptionseigenschaften	42
4.4 Strahldiagnostik und Werkzeugcharakterisierung	47
4.5 Statistische Versuchsplanung - Design of Experiment (DoE)	49
4.5.1 Auswahl der Versuchspläne	50
4.5.2 Statistische Datenanalyse	52
4.5.3 Response Surface Methode (RSM)	52
4.6 Optische Methode zur Ermittlung der Fokusbildung mittels „line test“	53
4.7 Prozessentwicklung zur Mikrolaserablation	54
4.8 Vorgehen bei der Entwicklung der akustischen Prozesskontrolle	58

5 Ergebnisse	59
5.1 Prozessfensteranalyse	59
5.1.1 Einzelpulsabtrag	59
5.1.2 Bahnabtrag	64
5.1.3 Ermittlung des Abtragverhaltens von WC-12Co zur Flächenablation ($2\frac{1}{2}D$)	68
5.2 Prozessparameterfindung im Schnelltest mittels RSM	72
5.2.1 Definition des Versuchsraums mit DoE	72
5.2.2 Ergebnis der Bearbeitung (WC-12Co)	74
5.2.3 Statistische Datenanalyse, Regression und Modelluntersuchung	75
5.2.4 Operations Research (OR) und Ergebnis des Schnelltests	76
5.2.5 Diskussion der Haupt- und Wechselwirkungseffekte	78
5.2.6 Validierung des Schnelltests für weitere Materialien und Diskussion	81
5.3 Entstehungsmechanismus unerwünschter Löcher im Bearbeitungsergebnis	83
5.3.1 Klassifizierung und Einflussanalyse zur Entstehung von Löchern	84
5.3.2 Ergebnisse der Untersuchung zum Entstehungsmechanismus	86
5.3.3 Diskussion zur Entstehung von Löchern	93
5.4 Analyse akustischer und optischer Emission	94
5.4.1 Einheit zur Erfassung akustischer (AE) Emissionen	95
5.4.2 Einheit zur Erfassung optischer (OE) Emissionen	101
5.4.3 Einflussanalyse und Versuchsplanung	102
5.4.4 Ergebnisse akustischer und optischer Emissionserfassung	105
5.4.5 Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Werkstoffe	115
5.4.6 Diskussion der Ursache des lokalen Signaleinbruchs der AE	118
5.5 Akustische Prozesskontrolle und- automatisierung	120
5.5.1 Strategieentwicklung und Diskussion der Nutzung von AE zur akustischen In-Prozess-Regelung	120
5.5.2 Ableitung des Regelkriteriums	121
5.5.3 Ergebnisse der akustischen Prozesskontrolle und -automatisierung	122
6 Abschließende Bewertung	136
7 Zusammenfassung und Ausblick	142
Literaturverzeichnis	I
Anhang	XII