

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

M. Weikert  
Oberflächenstrukturieren mit ultra-  
kurzen Laserpulsen

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

# **Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen**

von Dr.-Ing. Michael Weikert  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Friedrich Dausinger  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische  
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2005

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,  
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der  
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem  
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-  
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2006

ISBN 3-8316-0573-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	5
Inhaltsverzeichnis	7
Verzeichnis der Symbole	9
Extended Abstract	13
1 Motivation und Zielsetzung	17
2 Stand der Technik und des Wissens	20
2.1 Abtragsverfahren .....	20
2.1.1 Mechanische Verfahren .....	20
2.1.2 Elektroerosive Verfahren (EDM) .....	22
2.1.3 Ätzverfahren .....	22
2.1.4 Elektronen- und Ionenstrahlabtragen .....	24
2.1.5 Laserabtragen .....	25
2.1.6 Kombination von Verfahren .....	26
2.1.7 Abtragen mit ultrakurzen Laserpulsen .....	26
2.2 Physikalische Grundlagen .....	27
2.2.1 Absorption elektromagnetischer Strahlung .....	28
2.2.2 Wärmetransport in Materie .....	30
2.2.3 Plasma und Materialdampf .....	32
2.3 Ergebnisse grundlegender Untersuchungen .....	33
3 Experimentelle Grundlagen	37
3.1 Erzeugung ultrakurzer Laserpulse .....	37
3.2 Eingesetzte Lasersysteme .....	42

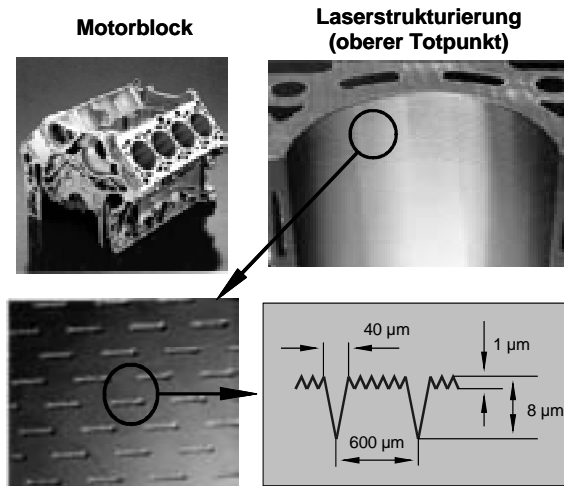
---

3.3	Strahlführung und Strahlformung.....	44
3.4	Geometrierzeugung.....	46
3.5	Probenaufbereitung.....	56
4	Experimentelle Untersuchungen	63
4.1	Einfluss verschiedener Prozessparameter.....	63
4.1.1	Pulsdauer.....	63
4.1.2	Energiedichte.....	68
4.1.3	Pulsüberlapp.....	72
4.1.4	Multipass-Abtragen.....	79
4.1.5	Fokuslage.....	90
4.1.6	Repetitionsrate.....	93
4.2	Vergleich unterschiedlicher Lasersysteme.....	96
4.3	Anwendungsbeispiele.....	98
4.3.1	Probekörper für tribologische Untersuchungen.....	98
4.3.2	Einlaufstrukturen an Turbinenschaufeln.....	99
4.3.3	Herstellung von Druck- und Prägeformen.....	100
5	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Literatur- und Quellenverzeichnis	105

# 1 Motivation und Zielsetzung

Der Laser hat sich in den vergangenen Jahren zu einem verlässlichen Werkzeug in der Fertigung entwickelt, viele Erzeugnisse sind ohne Lasermaterialbearbeitung nicht mehr denkbar. Gerade in der Fein- und Mikrotechnik hilft der Laser, vieles wirtschaftlich realisierbar zu machen, teilweise wird die Herstellung bestimmter Produkte durch die Lasertechnik überhaupt erst möglich. Aber nicht nur die Herstellung immer kleinerer Bauteile wird durch die Lasermaterialbearbeitung erleichtert. In jüngerer Zeit zeigt die Industrie ein zunehmendes Interesse an der Mikrostrukturierung von makroskopischen Werkstücken mit dem Ziel, die Bauteileigenschaften zu verbessern. Das Strukturieren mit Laserstrahlung ist hierfür ein vielversprechendes Fertigungsverfahren.

Ein zukunftssträchtiges Anwendungsfeld ist beispielsweise das Strukturieren von aufeinander gleitenden Oberflächen zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften [13, 14, 15]. Eine industrielle Anwendung ist z.B. das Laserhonen von Zylinderblöcken, das in Bild 1.1 dargestellt ist [16].



**Bild 1.1:** Laserhonen von Zylinderlaufbahnen, Quelle: Gehring.

Bei diesem Verfahren werden laserstrukturierte Taschen bzw. Nuten in die Zylinderwand von Verbrennungsmotoren eingebracht. Üblicherweise reißt der Ölfilm zwischen Kolben und Zylinderwand während der Richtungs- umkehr des Kolbens im oberen Totpunkt kurz ab. Die durch Laserhonen erzeugten Strukturen dienen als Ölreservoir und sorgen auch während dem kurzen Stillstand der Kolbenbewegung für eine

gleichmäßige Verteilung des Öls zwischen Kolben und Zylinderwand. Auf diese Weise können Reibung, Verschleiß und Ölverbrauch reduziert werden. Eine andere Serienanwendung der Laserstrukturierung ist das Texturieren von Festplatten in der Landezone des Lesekopfes [17]. Zur Vermeidung von Beschädigungen beim Transport werden die Leseköpfe von Festplatten beim Abschalten geparkt. Dazu wird der Lesekopf außerhalb der eigentlichen Speicherfläche auf der Plattenoberfläche aufgesetzt. Aufgrund der hohen Oberflächengüte kann es beim Wiederanfahren zu Adhäsion kommen, was bei den extrem hohen Geschwindigkeiten zu Problemen führen kann. Durch Laserstrukturieren werden kleine erhöhte Strukturen, sogenannte Sombbrero-Bumps, in die Oberfläche der Landezone eingebracht. Die tatsächliche Auflagefläche des Lesekopfes wird dadurch wesentlich verkleinert, was Reibung und Adhäsion deutlich mindert.

Für Laserverfahren, bei denen Material durch Verdampfen abgetragen werden soll, ist eine sehr hohe Spitzenleistung notwendig, weshalb hierfür hauptsächlich gepulst betriebene Lasersysteme eingesetzt werden. Abhängig von Material, Volumenabtragsrate und gewünschter Strukturpräzision kommen Lasersysteme mit unterschiedlichen Pulsdauern zum Einsatz, wobei die Präzision mit der Verkürzung der Pulsdauern tendenziell steigt. Aufgrund der notwendigen Stabilität und Zuverlässigkeit der Strahlquellen werden heute im industriellen Einsatz überwiegend Laser mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich eingesetzt. Beim Abtragen von Metallen mit Nanosekundenpulsen entsteht jedoch Schmelze, die sich teilweise in Schmelzschichten und Graten ablagert und die Strukturpräzision negativ beeinflusst. Verschiedene Veröffentlichungen zeigen, dass durch Verkürzen der Pulsdauer in den Femtosekundenbereich die Bildung von Schmelze vermieden werden kann [3, 18, 19]. Strahlquellen mit Pulsdauern im Femto- und Pikosekundenbereich sind zur Zeit noch relativ komplexe Systeme, was den Einsatz der Ultrakurzpulstechnologie auf den Labormaßstab beschränkt. Die Verfügbarkeit von industrietauglichen Laserstrahlquellen mit Pulsdauern im Femto- und Pikosekundenbereich ist in den kommenden Jahren zu erwarten.

Während in früheren Arbeiten gezeigt wurde, dass ein schmelzfreier Abtrag von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen grundsätzlich möglich ist, steht bei der vorliegenden Arbeit die industriennahe Umsetzung dieser Technologie im Vordergrund. Anhand zahlreicher Experimente sollen der Einfluss grundlegender Bearbeitungsparameter dargestellt und Zielparameter für geeignete, industrietaugliche Lasersysteme herausgearbeitet werden. Während bei früheren Untersuchungen zum Abtragen mit Femtosekundenpulsen häufig mit abbildenden Verfahren gearbeitet wurde, wird der Strahl im Rahmen der vorliegenden Arbeit direkt auf das Werkstück fokussiert. Diese Methode



---

wird bei den meisten industriellen Anwendungen eingesetzt und zeichnet sich gegenüber abbildenden Verfahren durch eine größere Flexibilität aus. Die Erzeugung ultrakurzer Laserpulse wird zu kürzeren Pulsen hin immer aufwändiger. Deshalb ist es im Hinblick auf industrietaugliche Lasersysteme von Bedeutung, bei welchen Pulsdauern eine ablagerungsfreie Bearbeitung möglich ist. Für eine wirtschaftliche Anwendung ist oft die Zeit entscheidend, weshalb in der vorliegenden Arbeit auch untersucht werden soll, wie die Bearbeitungsgeschwindigkeit gesteigert werden kann.