

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

T. Abeln  
Grundlagen und Verfahrenstechnik  
des reaktiven Laserpräzisionsabtragens  
von Stahl

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, 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.

# **Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl**

Von Dr.-Ing. Tobias Abeln  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

D 93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik  
der Universität Stuttgart

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

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist  
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2002

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 Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0137-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

# Kurzfassung

Fortschreitende Entwicklungen in der Mikroelektronik und -systemtechnik verlangen kontinuierlich nach neuen präziseren Fertigungsverfahren. Daraus ergibt sich die Forderung, metallische Werkstoffe präzise zu strukturieren.

Deshalb befasst sich diese Arbeit mit dem Verfahren des Laser-Mikrospanens, um insbesondere die Strukturpräzision zu erhöhen. Bei diesem Prozess wird der Werkstoff auf Zündtemperatur erhitzt und unter Sauerstoffumgebung oxidiert. Dadurch kann erreicht werden, dass das Material nicht über die schmelzflüssige Phase abgetragen wird. Der entstehende Oxidspan kann dadurch in fester Form von der Materialoberfläche entfernt werden. Dabei kommen Festkörperlaser zum Einsatz, die bei hoher Strahlqualität eine gute Fokussierbarkeit ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit wird das Prozessverständnis des Laserspanens erweitert. Dies erfolgt insbesondere durch die Betrachtung der ablaufenden Vorgänge in der Wechselwirkungszone sowie durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen.

Dabei hat sich gezeigt, dass sich eine in Abhängigkeit von den Prozessparametern mehr oder weniger stark ausgeprägte Dampfkapillare (Keyhole) ausbildet, wie sie vom Laserschweißen bekannt ist. Dadurch wird die Oxidschicht dünn gehalten, welche die Reaktionspartner Fe und O<sub>2</sub> voneinander trennt, und es sind relativ hohe Strukturtiefen erreichbar.

Auf das Abtragsergebnis haben verfahrenstechnische und materialspezifische Einflussfaktoren starke Auswirkungen. Um einen flächigen Abtrag zu erzeugen, werden die einzelnen Bearbeitungsspuren mit einem bestimmten Überlapp aneinander gereiht. Dabei hat sich gezeigt, dass der optimale Bahnversatz, um eine geringe Oberflächenrauheit zu erzielen, in einem Bereich zwischen 1/4 und 1/5 des Fokusdurchmessers liegt. Bei unlegierten und legierten Stählen ohne das Legierungselement Nickel war mit zunehmender Leistung eine lineare Zunahme der Strukturtiefe zu beobachten. Dabei nimmt die Abtragsrate mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt des Werkstoffs zu. Die Legierungselemente zeigen einen starken Einfluss auf die Spanbildung. Hochlegierte Werkstoffe bilden zusammenhängende, flächige Oxidspäne aus, wohingegen der Span bei unlegierten Werkstoffen relativ schnell zerfällt. Tiefe und dreidimensionale Strukturen mit geringer Rauheit des Strukturgrunds können über eine Mehrfachbearbeitung erzielt werden.

Mit dem Verfahren des reaktiven Abtragens ist es somit möglich, sehr präzise Strukturen unter Vermeidung eines Nachbearbeitungsverfahrens herzustellen. Anwendungsfelder sind insbesondere dort zu sehen, wo im Prototypenstadium häufig die Struktur geändert wird und somit eine hohe Flexibilität gefordert ist.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen.....</b>	<b>9</b>
<b>Extended Abstract.....</b>	<b>13</b>
<b>1 Motivation und Zielsetzung .....</b>	<b>17</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>19</b>
2.1 Einordnung der Bearbeitungsverfahren.....	19
2.2 Konventionelle Präzisionsbearbeitungsverfahren.....	20
2.2.1 Mechanische Verfahren .....	20
2.2.2 Funkenerosive Verfahren (EDM) .....	20
2.2.3 Ätzverfahren und elektrochemische Verfahren (ECM) .....	21
2.2.4 Lithographische Verfahren .....	22
2.2.5 Ultraschallbearbeitungsverfahren (USM) .....	23
2.2.6 Ionen- und Elektronenstrahlverfahren .....	23
2.2.7 Laserverfahren .....	24
2.2.8 Verfahrensvergleich .....	26
2.3 Laserspanen .....	27
<b>3 Physikalische und technologische Grundlagen des Laserspanens.....</b>	<b>30</b>
3.1 Physikalische Grundlagen .....	30
3.1.1 Phänomenologie.....	30
3.1.2 Energiehaushalt des Laserspanens .....	36
3.1.3 Phänomenologische Abläufe des Laser-Mikrospanens .....	49
3.1.4 Wechselwirkungsprozesse beim reaktiven Abtragen .....	52
3.1.5 Spanbildung und -ablösung.....	60
3.2 Technologische Grundlagen.....	64
3.2.1 Bearbeitungsstrategien beim Abtragen .....	64
3.2.2 Einflussgrößen auf den Flächenabtrag .....	66
3.2.3 Bestimmung des Abtragsvolumens.....	67

3.2.4 Bestimmung der Rauheit.....	67
3.2.5 3-D-Flächenabtrag .....	70
<b>4 Experimentelle Untersuchungen.....</b>	<b>73</b>
4.1 Systemtechnik .....	73
4.1.1 Laserstrahlquelle .....	73
4.1.2 Strahlführung und -formung .....	79
4.1.3 Positioniersystem .....	82
4.2 Untersuchung der Prozessparameter/Einflussfaktoren.....	84
4.2.1 Generelle Zusammenhänge.....	84
4.2.2 Einfluss des Bahnversatzes .....	94
4.2.3 Einfluss der Gasströmung .....	96
4.2.4 Einfluss der Laserleistung.....	98
4.2.5 Einfluss des Kohlenstoffgehalts.....	99
4.2.6 Einfluss der Legierungselemente.....	101
4.2.7 Einfluss der Verfahrgeschwindigkeit.....	106
4.2.8 Oxidausbildung .....	109
4.2.9 Einfluss der Wellenlänge .....	111
4.2.10 Mehrfachbearbeitung .....	113
4.3 Anwendungsbeispiele.....	118
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>122</b>
<b>6 Anhang.....</b>	<b>125</b>
6.1 Werkstoffe – Chemische Zusammensetzung .....	125
6.2 Werkstoffe – Physikalische Werkstoffkennwerte .....	126
<b>Literatur .....</b>	<b>127</b>