

# **Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung**

von Dr.-Ing. Dmitrij Walter  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kück

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2010

D 93

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2010

ISBN 978-3-8316-0968-0

Printed in Germany

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

# Inhalt

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Inhalt</b>	<b>7</b>
<b>Liste der verwendeten Symbole</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>19</b>
1.1 Ausgangslage . . . . .	19
1.2 Motivation und Zielsetzung der Arbeit . . . . .	21
<b>2 Grundlagen abtragender Laserverfahren</b>	<b>24</b>
2.1 Materialabtrag mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung . . . . .	24
2.1.1 Energieeinkopplung . . . . .	24
2.1.2 Zwei-Temperatur-Modell . . . . .	25
2.1.3 Dynamik der Wechselwirkung von Laserstrahlung mit Materie	28
2.2 Laserinduzierte Plasmen . . . . .	30
2.2.1 Materialdampfplasma . . . . .	30
2.2.2 Partikelinitiiertes Plasma . . . . .	32
2.2.3 Dielektrischer Gasdurchbruch . . . . .	33
2.2.4 Zusammenfassung . . . . .	36
2.3 Laserinduzierte Stoßwellen . . . . .	37
2.4 Kapillarausbildung beim Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen . . . . .	42
2.4.1 Bohrtiefenfortschritt und Bohrungsdurchbruch . . . . .	42
2.4.2 Radiale Aufweitung der Austrittsöffnung und Prozessende . . . .	49
<b>3 Stand der Technik in der Prozessüberwachung</b>	<b>51</b>
3.1 Prozessüberwachungsmethoden beim Bohren mit gepulster Laserstrahlung	52
3.2 Überwachungsverfahren beim Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen . . . .	54
3.3 Zusammenfassung . . . . .	56
<b>4 Experimentelle Methoden</b>	<b>58</b>
4.1 Verwendete Strahlquellen . . . . .	58

4.2	Bildgebende Verfahren zur Charakterisierung der gasdynamischen Stoßwellenausbreitung . . . . .	60
4.3	Zeitaufgelöste Plasmaspektroskopie – Erfassung optischer Prozessemissionen . . . . .	63
4.4	Messung des Ionisationsgrades der Materialdampf Wolke . . . . .	66
4.5	Aufnahme des Luft- und Körperschalls . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Überwachung des Bohrprozesses durch Auswertung der gasdynamischen Stoßwellenexpansion</b>	<b>70</b>
5.1	Ausbreitungsverhalten der Stoßwellen beim Laserbohren . . . . .	70
5.1.1	Grundlegende Betrachtung der Stoßwellendynamik . . . . .	70
5.1.2	Detektion der Bohrungstiefe . . . . .	73
5.1.3	Überwachung des Bohrungsdurchbruchs . . . . .	75
5.1.4	Aufweitung des Bohrungsaustrittes und Bearbeitungsende . . . . .	78
5.2	Einfluss der Prozessparameter . . . . .	81
5.2.1	Einfluss der Pulsdauer . . . . .	81
5.2.2	Variation der Pulsenergie . . . . .	82
5.2.3	Einfluss der relativen Fokusslage . . . . .	84
5.2.4	Variation des Werkstoffs . . . . .	86
5.3	Plasmaeinflüsse auf die Stoßwellenausbreitung . . . . .	88
5.3.1	Stoßwellendynamik für unterschiedliche Pulszahlen . . . . .	88
5.3.2	Variation des zeitlichen Abstandes der Laserpulse . . . . .	89
5.3.3	Einfluss der Bohrkapillargeometrie auf das Ausbreitungsverhalten der Stoßwellen . . . . .	92
5.3.4	Erlangtes Prozessverständnis . . . . .	93
5.4	Zusammenfassung . . . . .	97
<b>6</b>	<b>Prozessüberwachung durch koaxiale Erfassung optischer Prozessemissionen</b>	<b>100</b>
6.1	Zeitaufgelöste Spektroskopie am laserinduzierten Plasma . . . . .	100
6.2	Integrale, breitbandige Aufnahme der optischen Prozessemissionen . . . . .	105
6.2.1	Überwachung einzelner Bohrphasen . . . . .	106
6.2.2	Einfluss der Bearbeitungsstrategie . . . . .	111
6.2.3	Prozesskontrolle bei der Bearbeitung unter reduziertem Atmosphärendruck . . . . .	112
6.3	Echtzeit-Überwachung und -regelung des Bohrprozesses . . . . .	115
6.4	Zusammenfassung . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Überwachung des Laserbohrens durch Erfassung des Ionisationsgrades der</b>	

---

<b>Materialdampfwolke</b>	<b>122</b>
7.1 Charakterisierung des Sensorelements . . . . .	122
7.2 Erste experimentelle Untersuchungen . . . . .	124
<b>8 Prozessdiagnostik und -überwachung durch Erfassung akustischer Signale mit piezoelektrischen Aufnehmern</b>	<b>126</b>
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>130</b>
<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	<b>135</b>
<b>Danksagung</b>	<b>146</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Der Laser hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einem wichtigen und zuverlässigen Werkzeug in zahlreichen Anwendungsfeldern der industriellen Fertigungstechnik entwickelt. Seine Vorteile hinsichtlich der Bearbeitungsqualität, der Produktivität, der Automatisierbarkeit sowie der Vielseitigkeit eröffnen der Lasertechnik ein erhebliches Wachstumspotenzial nicht nur in bereits etablierten Anwendungsbereichen, sondern auch in weiteren bisher nicht abgedeckten Arbeitsgebieten.

Gerade im Bereich der Mikrobearbeitung von Metallen hat sich die Laserstrahlung aufgrund ihrer hervorragenden Fokussierbarkeit als besonders nützliches Werkzeug erwiesen. Bei der Herstellung von Bauteilen bzw. der Einbringung von Strukturen, welche oftmals Abmessungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich aufweisen, zeichnet sich die Lasertechnik gegenüber den konkurrierenden mechanischen und nass- bzw. elektrochemischen Verfahren durch zahlreiche Vorzüge aus. Die kontaktfreie Bearbeitung ohne Werkzeugverschleiß und die hohe Flexibilität bezüglich der herzustellenden geometrischen Form bei gleichzeitig hoher Formtreue sind nur die wichtigsten Vorteile dieses Präzisionswerkzeugs. Vor diesem Hintergrund hat sich in der Vergangenheit eine große Anzahl an Anwendungen entwickelt, bei welchen der Materialabtrag durch die Beaufschlagung des Bauteils mit gepulster Laserstrahlung erfolgt. Dazu zählt die Einbringung tausender lasergebohrter Löcher in Kraftstofffilter im Automobilbau [1] genauso wie die Erzeugung von Schmierbohrungen in Motorkomponenten [2] und von Kühlbohrungen in Turbinenschaufeln [3, 4]. Im Bereich des Oberflächenstrukturierens werden in tribologisch beanspruchte Oberflächen, wie beispielsweise bei Gleitlagern oder Zylinderlaufbuchsen, kleinste flache Strukturen eingebracht, um ihre Gleiteigenschaften zu verbessern [5, 6]. Vor allem haben jedoch die hohen Anforderungen an die Formtreue und Wiederholungsgenauigkeit von Präzisionsbohrungen, welche in Dieseleinspritzdüsen im KFZ-Bereich eingebracht werden, in jüngster Zeit zu der Weiterentwicklung der Technik des Laserbohrrens beigetragen. Die geforderten hohen Aspektverhältnisse mit Bohrungsdurchmessern unterhalb von  $100\ \mu\text{m}$  in einem  $1\ \text{mm}$  dicken Stahlkörper stellen jedoch weiterhin eine große Herausforderung an den Bearbeitungsprozess dar.

In den bisher dargestellten Anwendungen gepulster Laserstrahlung in der industriellen Mikrobearbeitung von Metallen werden überwiegend Pulsdauern im Milli- und Mikrosekundenbereich eingesetzt. Erst seit wenigen Jahren erfolgt eine verstärkte Einführung leistungsfähiger Laserstrahlquellen mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich in der Fertigung. Die erreichbare Präzision der Bearbeitung ist in diesem Pulsdauerregime jedoch in vielen Fällen immer noch unzureichend. Bei solch vergleichsweise langen Pulsdauern erfolgt der Materialabtrag überwiegend in schmelzflüssiger Form, so dass qualitätsbeeinträchtigende Schmelzanhaftungen an den Bohrungswänden und an der Materialoberfläche zurückbleiben.

Die Ergebnisse einiger Studien haben jedoch gezeigt, dass sich durch eine weitere Verkürzung der Einwirkdauer des Laserstrahls, d.h. durch den Einsatz von Pulsdauern im Ultrakurzpulsbereich, eine erhebliche Qualitätsverbesserung erzielen lässt [7–9]. Die Erforschung des Potenzials der ultrakurzen Laserpulse im Femtosekunden- und Pikosekundenbereich für fertigungstechnische Anwendungen ist im letzten Jahrzehnt aus diesem Grund Gegenstand zunehmender Forschungsaktivitäten geworden. Es wurde gezeigt, dass die Verkürzung der Pulsdauer auf Werte unter 10 ps in der Tat eine deutliche Steigerung der Bearbeitungsqualität bewirkt, welche den höchsten Anforderungen entspricht. In Verbindung mit der verfahrenstechnischen Bearbeitungsstrategie des Wendelbohrens konnte eine nahezu schmelzfreie Bearbeitung nachgewiesen werden [10]. Hierbei erfolgt eine kreisförmige Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl, so dass die Bohrungsgeometrie im Wesentlichen von dessen Kreisbewegung bestimmt wird. Die eigentliche Abtragsfront bewegt sich auf einer spiralartigen Bahn ins Werkstück, wobei im Gegensatz zum Perkussionsbohren (Beaufschlagung einer einzigen Bearbeitungsstelle mit Laserpulsen) eine höhere Formtreue der Bohrungsgeometrie erzeugt wird. Die dabei erreichbare hohe Bearbeitungsqualität geht allerdings mit einer Reduzierung der Produktivität einher. Zum Einen wird in diesem Pulsdauerregime eine geringere pro Puls abgetragene Materialmenge realisiert, zum Anderen sind die Strahlquellen mit Pulsdauern im Femto- und Pikosekundenbereich relativ komplexe Systeme mit niedrigen Repetitionsraten im einstelligen Kilohertzbereich, wodurch pro Bohrung typischerweise mehrere zehn Sekunden Bearbeitungszeit benötigt werden.

Seit jüngster Zeit stehen allerdings kommerzielle, industrietaugliche Laserstrahlquellen mit Pulsdauern von wenigen Pikosekunden, erheblich höheren Pulswiederholraten (bis 500 kHz) und hohen mittleren Leistungen (bis 50 W) zur Verfügung [11]. Durch solche neuartige Laserstrahlquellen lässt sich die Schwelle der Wirtschaftlichkeit des Laserbohrens mittels ultrakurz gepulster Strahlung überwinden, so dass zukünftig der Einsatz der Ultrakurzpulstechnologie nicht auf den Labormaßstab beschränkt bleiben muss. Ganz im Gegenteil ist in den nächsten Jahren mit einem verstärkten Transfer vielfältiger An-

wendungen ins industrielle Umfeld zu rechnen.

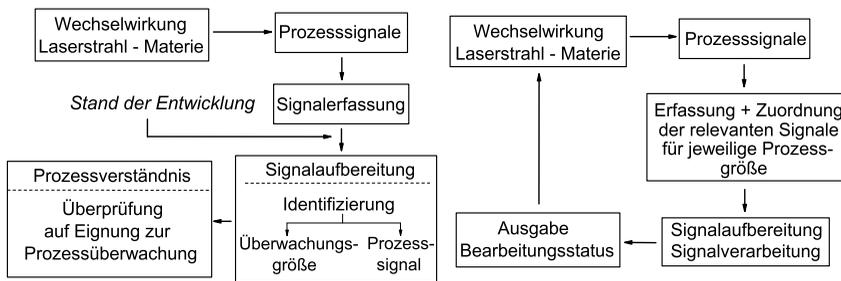
Gerade bei der bereits erwähnten Einbringung von Mikrobohrungen mit hohem Aspektverhältnis in Dieseleinspritzdüsen im KFZ-Bereich ist die verfahrenstechnische Prozessentwicklung so weit vorangeschritten, dass Bohrungen mit hoher Qualität in einer wirtschaftlich sinnvollen Bearbeitungsdauer erzeugt werden können. Neben der Wirtschaftlichkeit und der erzielbaren Qualität bestimmen allerdings weitere nicht minder wichtige Faktoren die Einführung dieses Verfahrens in die Massenfertigung. So ist die exakte Einhaltung des geforderten Bohrungsaustrittdurchmessers für die technische Nutzung der Einspritzdüse besonders wichtig, da er als relevante Größe nicht nur den Kraftstoffdurchfluss, sondern auch das Sprühbild des Fluids bestimmt. Neben den extremen Anforderungen an die Morphologie und die geometrischen Abmessungen der Bohrung besteht seitens der Hersteller der Wunsch, weitere qualitätsbestimmende Größen im Verlauf des Laserbohrprozesses zu erfassen und damit gegebenenfalls regelnd in den Prozess eingreifen zu können. Eine erhebliche Steigerung der Einhaltung der Maßhaltigkeit der Bohrung sowie eine höhere Reproduzierbarkeit wären dabei die Folge.

## 1.2 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Vor dem Hintergrund stetig zunehmender Anforderungen an Qualität und Produktivität des Laserbohrprozesses rückt neben der weit vorangeschrittenen Verfahrensentwicklung insbesondere die Überwachung und Sicherung des Bearbeitungsprozesses immer stärker in den Vordergrund. Erst mit Hilfe eines automatisierten Überwachungssystems lassen sich eine hohe Reproduzierbarkeit, eine Reduzierung des Ausschusses und eine Verkürzung der Bearbeitungsdauer sicherstellen. Als überwachungsrelevante Größen bzw. wichtige Charakteristika des Bohrprozesses sind hierbei die aktuelle Bohrungstiefe, der Zeitpunkt des Bohrungsdurchbruchs durch die gesamte Materialstärke, der Durchmesser der Austrittsöffnung (Aufweitung der Bohrkapillare) und das Erzielen der maximal erreichbaren Größe der Austrittsöffnung (Prozessende) zu nennen. Eine Echtzeit-Überwachung dieser Größen ermöglicht nicht nur eine Sicherung des Endergebnisses, sondern erlaubt dem Hersteller bei auftretenden Abweichungen von der Sollgeometrie, regelnd in den Laserbohrprozess eingzugreifen.

Zwar existieren auf dem Gebiet des Laserbohrens mit Pulsdauern im ns-Bereich eine Vielzahl an experimentell erprobten oder gar in der Fertigung eingesetzten Messverfahren bzw. Überwachungsmethoden. Ihre erfolgreiche Übertragung auf das Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen lässt sich allerdings aufgrund eines völlig unterschiedlichen physikalischen Abtragsmechanismus nicht ohne eingehende experimentelle Verifizierung

umsetzen. Auf dem vergleichsweise jungen Anwendungsfeld der Mikromaterialbearbeitung mit Femtosekunden- oder Pikosekundenpulsen sind die verfügbaren Ergebnisse zur Überwachung der Bearbeitung noch rudimentär und haben das Stadium der universitären Forschung noch lange nicht verlassen. Zum heutigen Zeitpunkt der Forschung ist die Zuordnung der vom Prozess emittierten Signale zu den qualitätsrelevanten Größen nur in Ansätzen untersucht. Für die Konzipierung eines übergeordneten Qualitätssicherungssystems ist die Überwachung von Einflussgrößen wie z.B. der Fokuslage oder der Laserleistung als qualitätsrelevantes Kriterium hingegen nur bedingt oder gar nicht geeignet. Ziel für die Entwicklung eines online-Qualitätssicherungssystems muss deshalb sein, prozessbeschreibende Indikatoren zu finden, die Qualitätsmerkmale entweder direkt darstellen (beispielsweise Bohrungstiefe) oder mit den qualitätsrelevanten Größen des Laserbohrprozesses korrelieren (z.B. optisches Prozessleuchten). Sind diese Größen in ihrem Einfluss auf das Bohrergebnis separierbar, ist die Grundlage für eine Qualitätsüberwachung geschaffen.



**Bild 1.1:** Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der wissenschaftlichen Entwicklung eines Überwachungskonzepts (linke Darstellung). Nach der Erfassung unterschiedlicher Prozesssignale muss eine Identifizierung zwischen der zu überwachenden Prozessgröße und dem entsprechenden prozessbeschreibenden Signal erfolgen. Erst im nächsten Schritt kann der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen hinsichtlich einer Eignung zur Prozessüberwachung ermittelt werden. Der aktuelle Stand der Entwicklung auf dem Gebiet des Laserstrahlbohrens mit ultrakurzen Pulsen ist im Diagramm durch einen Pfeil gekennzeichnet. Auf der rechten Seite ist eine idealisierte Darstellung eines industriell eingesetzten, experimentell evaluierten Überwachungssystems wiedergegeben. Nach der Erfassung eines der entsprechenden Überwachungsgröße zugeordneten Prozesssignals wird dieses mit einem angepassten Auswertalgorithmus ausgewertet, und der aktuelle Bearbeitungsstatus ausgegeben. Anhand dieses Signals wird die Bearbeitung fortgesetzt bzw. abgeschlossen.

In Bild 1.1 sind die Flussdiagramme eines Überwachungsablaufs in der industriellen Umgebung (rechte Darstellung) und die Vorgehensweise bei der wissenschaftlichen Entwicklung eines Überwachungskonzepts (linke Darstellung) wiedergegeben. Während beim

geschlossenen Überwachungs- und Regelkreis des evaluierten Industriesystems die Zuordnung der relevanten Prozesssignale zu der jeweils zu detektierenden Qualitätsgröße problemlos erfolgt, muss im anderen Fall diese Zuordnung zunächst aus zahlreichen experimentellen Untersuchungen erschlossen werden. Im nächsten Schritt muss die Eignung des detektierten Prozesssignals zur Prozessüberwachung hinsichtlich mathematischer Abhängigkeiten überprüft werden, womit bei einer eindeutigen Korrelation zwischen den Größen der Schritt zur Vorstufe eines industrierelevanten Überwachungssystems realisiert ist. Der aktuelle Stand der Entwicklung der Qualitätssicherung beim Bohren von metallischen Materialien mit ultrakurz gepulster Strahlung ist in der linken Darstellung mit einem Pfeil gekennzeichnet.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, Ansätze für eine Prozessüberwachung beim Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen aus physikalischer Sicht zu evaluieren, wobei ein möglichst umfassendes Spektrum an Prozessemissionen in die Untersuchungen miteinbezogen werden soll. Die vielversprechensten Methoden sollen näher charakterisiert und auf ihre Eignung zu Zwecken der Prozesssicherung im industriellen Umfeld hin eingestuft werden. Im Mittelpunkt der Arbeit steht dabei die qualitative Analyse der grundlegenden Zusammenhänge zwischen den prozessbedingten Signalen und den zu detektierenden qualitätsrelevanten Größen. Im Laufe der experimentellen Untersuchungen sollen nicht nur entsprechende Signalerfassungssysteme, sondern auch Signalaufbereitungs- sowie Auswertalgorithmen entwickelt werden.

Bei vielen speziellen Anwendungen, zu denen ebenfalls das Bohren von Dieseleinspritzdüsen im KFZ-Bereich mitzählt, bestehen weitere Anforderungen an die räumliche Anordnung der Sensoren in der bestehenden Anlage. Vor allem aufgrund der stark eingeschränkten Zugänglichkeit der Bauteilrückseite wird in solchen Fällen die Positionierungsmöglichkeit der Überwachungseinheit erheblich eingeschränkt. Besonderes Augenmerk muss daher im Laufe der Untersuchungen auf die Realisierung der Überwachungskonzepte auf der laserzugewandten Seite des zu bearbeitenden Werkstücks gelegt werden.

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

### **Zoske, Uwe**

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen  
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

### **Gorriz, Michael**

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen  
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

### **Mohr, Ursula**

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO<sub>2</sub>-Laserschneiden von Metallen  
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

### **Rudlaff, Thomas**

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen  
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

### **Borik, Stefan**

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern  
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

### **Paul, Rüdiger**

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO<sub>2</sub>-Lasern  
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

### **Wahl, Roland**

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung  
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

### **Frederking, Klaus-Dieter**

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr  
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

### **Grünewald, Karin M.**

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO<sub>2</sub>-Lasern  
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

### **Shen, Jialin**

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr  
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

### **Arnold, Johannes M.**

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern  
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

### **Holzwarth, Achim**

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern  
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

### **Dausinger, Friedrich**

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeffektivität  
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

### **Meiners, Eckhard**

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß  
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

### **Beck, Markus**

Modellierung des Lasertiefschweißens  
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

### **Breining, Klaus**

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

### **Griebisch, Jürgen**

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen  
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

### **Kreputat, Walter**

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser  
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

### **Xiao, Min**

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Lasern  
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

### **Glumann, Christiane**

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen  
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

### **Gross, Herbert**

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen  
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

### **Rapp, Jürgen**

Laserschweißseignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau  
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

**Wittig, Klaus**

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung  
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

**Grünenwald, Bernd**

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

**Lee, Jae-Hoon**

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung  
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

**Albinus, Uwe N. W.**

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren  
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

**Wiedmaier, Matthias**

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren  
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

**Bloehs, Wolfgang**

Laserstrahlhärten mit angepaßten Strahlformungssystemen  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

**Bea, Martin**

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

**Stöhr, Michael**

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden  
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

**Pläß, Wilfried**

Zerstörungsschwellen und Degradation von CO<sub>2</sub>-Laseroptiken  
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

**Schaller, Markus K. R.**

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän  
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

**Hack, Rüdiger**

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW  
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

**Krupka, René**

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser  
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

**Pfeiffer, Wolfgang**

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

**Volz, Robert**

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern  
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

**Bartelt-Berger, Lars**

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

**Müller-Hummel, Peter**

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspaltung  
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

**Rohde, Hansjörg**

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser  
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

**Huonker, Martin**

Strahlführung in CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung  
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

**Callies, Gert**

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen  
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

**Schubert, Michael E.**

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern  
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

**Kern, Markus**

Gas- und magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen  
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

**Raiber, Armin**

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

# Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

## **Schittenhelm, Henrik**

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas  
beim Abtragen und Schweißen  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

## **Stewen, Christian**

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung  
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

## **Schmitz, Christian**

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen  
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

## **Karszewski, Martin**

Scheibenlaser höchster Strahlqualität  
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

## **Chang, Chin-Lung**

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

## **Haag, Matthias**

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern  
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

## **Bahn Müller, Jochen**

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren  
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

## **Schellhorn, Martin Carl Johannes**

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen  
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

## **Angstenberger, Birgit**

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten  
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

## **Bachhofer, Andreas**

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau  
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

## **Breitschwerdt, Sven**

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen  
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

## **Mochmann, Gunter**

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren  
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

## **Herrmann, Andreas**

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlöten mit Diodenlasern  
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

## **Mästle, Rüdiger**

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung  
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

## **Voß, Andreas**

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG  
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

## **Müller, Matthias G.**

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

## **Abeln, Tobias**

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl  
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

## **Erhard, Steffen**

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser  
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

## **Contag, Karsten**

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers  
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

## **Krastel, Klaus**

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen  
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

## **Staud, Jürgen**

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

## **Schinzel, Cornelius M.**

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau  
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

## **Sebastian, Michael**

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen  
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

**Lücke, Bernd**

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays  
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

**Hohenberger, Bernd**

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-  
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-  
xibilität und verfügbarer Strahlleistung  
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

**Jasper, Knut**

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und  
-führung für die Mikrotechnik  
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

**Heimerdinger, Christoph**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen  
für die Luftfahrt  
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-3

**Christoph Fleig**

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen  
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer  
Komponenten  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

**Joachim Radtke**

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-  
ramischen Werkstoffen mittels repetierender  
Laserbearbeitung  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

**Michael Brandner**

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und  
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern  
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

**Reinhard Winkler**

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von  
Aluminium-Druckguss  
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

**Helmut Kindler**

Optische und gerätetechnische Entwicklungen  
zum Laserstrahlspritzen  
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

**Andreas Ruf**

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-  
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern  
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

**Guido Hergenhan**

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-  
temkonzept und experimentelle Verifizierung  
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

**Klaus Goth**

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumi-  
numguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-Laser  
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

**Armin Strauch**

Effiziente Lösung des inversen Problems beim  
Laserstrahlschweißen durch Simulation und  
Experiment  
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

**Thomas Wawra**

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-  
sion mittels Laserstrahlung  
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

**Michael Honer**

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren  
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung  
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

**Thomas Herzinger**

Prozessüberwachung beim Laserbohren von  
Turbinenschaufeln  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

**Reiner Heigl**

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-  
gusslegierungen mittels Laserstrahlung  
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

# Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

## Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl  
2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

## Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlasersdesign  
2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

## Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung  
2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

## Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokussmatrixtechnik  
2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

## Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen  
2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

## Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variabel-em Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen  
2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

## Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit  
2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

## Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung  
2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

## Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen  
2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

## Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung  
2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

## Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze  
2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

## Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Naht-eigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen  
2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

## Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen für Scheibenlaser  
2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

## Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen  
2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

## Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente  
2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

## Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiter-scheibenlasers  
2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

## Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen  
2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

## Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminium-legierungen mit Laserstrahlung: Prozessver-ständnis und Schichtcharakterisierung  
2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

## Detlef Breiting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung  
2010, 200Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4