

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

Inhalt

Kurzfassung	5
Inhalt	7
Liste der verwendeten Symbole	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Ausgangslage	19
1.2 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	21
2 Grundlagen abtragender Laserverfahren	24
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
3 Stand der Technik in der Prozessüberwachung	51
3.1 Prozessüberwachungsmethoden beim Bohren mit gepulster Laserstrahlung	52
3.2 Überwachungsverfahren beim Bohren mit ultrakurzen Laserpulsen	54
3.3 Zusammenfassung	56
4 Experimentelle Methoden	58
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
5	Überwachung des Bohrprozesses durch Auswertung der gasdynamischen Stoßwellenexpansion	70
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 Fokuslage	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
6	Prozessüberwachung durch koaxiale Erfassung optischer Prozessemissionen	100
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
7	Überwachung des Laserbohrens durch Erfassung des Ionisationsgrades der	

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

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 μm -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.

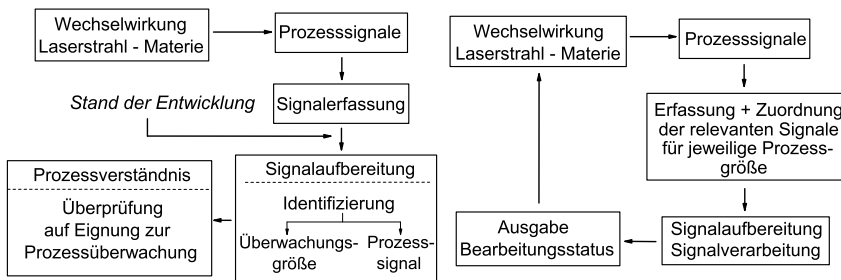


Bild 1.1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der wissenschaftlichen Entwicklung eines Überwachungskonzepts (linke Darstellung). Nach der Erfassung unterschiedlicher Prozesssignale muss eine Identifizierung zwischen der zu überwachenden Prozessgröße und dem entsprechenden prozessbeschreibenden 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

Gorritz, Michael

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

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂- 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 CO₂-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 CO₂-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

Zerstörungswellen und Degradation von CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 Zerspanung
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 CO₂-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 magnetofluiddynamische 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 CO₂-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 Scheibenlaserdesign
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