

Laser micromachining with target depth

von Dr.-Ing. Daniel Holder
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. Ing. André Zimmermann

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., 2023

D 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2023

Print ISBN 978-3-8316-5010-1
Ebook ISBN 978-3-8316-7746-7

Printed in Germany

utzverlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Table of contents

Table of contents	5
Symbols and abbreviations	7
Kurzfassung in deutscher Sprache	17
Extended Abstract	20
1 Introduction	23
1.1 Motivation	23
1.2 Analytical models for predicting the depth in micromachining with ultrashort laser pulses	25
1.3 Process monitoring and process control in laser micromachining of demanding applications	37
1.4 Process strategies for high-throughput laser milling with high energy efficiency and high surface quality	46
1.5 Summary of research needs	55
2 Development and verification of analytical models for the depth progress during micromachining of geometries with high aspect ratios	57
2.1 Analytical model for the depth progress of percussion drilling with ultrashort laser pulses.....	57
2.2 Analytical model for the depth progress during laser micromachining of V-shaped grooves	71
3 Investigation of depth-controlled laser milling for reliably achieving the target depth in advanced applications	90
3.1 High-quality net shape geometries from additively manufactured parts using closed-loop controlled ablation with ultrashort laser pulses	90
3.2 Additional results for additively manufactured parts built with support structures	107

3.3	Image processing based detection of the fibre orientation during depth-controlled laser ablation of CFRP monitored by optical coherence tomography	111
4	Scaling the throughput of high-quality laser milling with a 1 kW sub-picosecond laser	137
4.1	High-quality high-throughput silicon laser milling using a 1 kW sub-picosecond laser.....	137
4.2	Additional results for high-quality high-throughput laser milling of metals	148
5	Conclusion	151
	References.....	155
	Danksagung.....	181

Kurzfassung in deutscher Sprache

Die Lasermikrobearbeitung mit kurzen und ultrakurzen Laserpulsen ermöglicht eine besonders hohe Präzision und Qualität bei der Erzeugung verschiedenster Geometrien im Mikrometerbereich auf unterschiedlichen Materialien. Die Bandbreite der Verfahren und Geometrien reicht vom Perkussionsbohren von Mikrolöchern über das Gravieren von Nuten bis hin zum Lasermikrofräsen von einfachen Taschen oder komplexen Geometrien. Die Tiefe bzw. das Aspektverhältnis (Tiefe/Breite) der erzeugten Geometrie hat dabei meist einen großen Einfluss auf die Funktionalität der jeweiligen Anwendung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Lasermikrobearbeitungsprozesse mit Zieltiefe im Hinblick auf die drei Aspekte analytische Modellierung des Tiefenfortschritts, tiefengeregelter Materialabtrag und Skalierung des Durchsatzes beim Volumenabtrag untersucht.

Die analytische Modellierung des Tiefenfortschritts ermöglicht die Berechnung der Bearbeitungstiefe in Abhängigkeit der Prozessparameter, um damit vor dem Bearbeitungsprozess die Prozessparameter entsprechend auslegen zu können. Zur Berechnung des Tiefenfortschritts von Geometrien mit hohen Aspektverhältnissen (Tiefe/Breite) wurden zwei analytische Modelle hergeleitet:

Das Modell für perkussionsgebohrte Mikrolöcher basiert auf den Annahmen eines konisch geformten Lochs, eines zunehmenden Einkoppelgrads mit zunehmendem Aspektverhältnis aufgrund diffuser Mehrfachreflexionen innerhalb des Lochs und der Annahme, dass die absorbierte Bestrahlung linear mit der Tiefe des Lochs zunimmt. Die theoretische Vorhersage des Modells stimmt gut mit experimentellen Ergebnissen für Löcher mit einer Tiefe von bis zu 1,5 mm in Edelstahl überein, die mit Pikosekunden-Laserpulsen gebohrt wurden.

Das Modell für gravierte Nuten basiert auf den Annahmen einer V-förmigen Nutform, eines zunehmenden Einkoppelgrads mit zunehmendem Aspektverhältnis aufgrund von spekulären Mehrfachreflexionen innerhalb der Nut und der Annahme,

dass die absorbierte Bestrahlung linear mit der Tiefe der Nut zunimmt. Die theoretische Vorhersage stimmt gut mit den experimentellen Ergebnissen für Nuten bis zu einer Tiefe von 624 μm in einer Ti-Legierung überein, die mit Femtosekunden-Laserpulsen erzeugt wurden.

Die Messung und Regelung der Bearbeitungstiefe während der Mikrobearbeitung stellt sicher, dass die entsprechende Zieltiefe durch Anpassung der Prozessparameter erreicht wird. In der vorliegenden Arbeit wurde ein tiefengeregelter Materialabtrag durch eine in-situ Messung der lokalen Bearbeitungstiefe mittels optischer Kohärenztomographie und entsprechender Ansteuerung der Strahlquelle realisiert und dessen Potenzial anhand von zwei Anwendungen demonstriert:

Mittels pulverbettbasiertem Laserschmelzen generierte Metallbauteile erfordern aufgrund von Materialüberschüssen aus Stützstrukturen, Abweichungen von der angestrebten Nettoform und hohen Oberflächenrauigkeiten meist eine Nachbearbeitung. Das tiefengeregelte Abtragen mit ultrakurzen Laserpulsen ermöglichte die Detektion von überstehendem Material sowie einen lokal angepassten Abtrag. Dadurch konnten automatisiert Blockstützstrukturen entfernt sowie die Formabweichung und Oberflächenrauigkeit um 63% bis 81% auf 15 μm bzw. 5 μm reduziert werden.

Bei der Reparatur von Bauteilen aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen ist ein schichtgenaues Abtragen der geschädigten Bereiche als Vorbereitung für den Wiederaufbau des Bauteils mit passgenauen Reparaturlagen erforderlich. Die in-situ Messung der Oberflächentopographie beim Abtragen von carbonfaserverstärkten Kunststoffen ermöglichte die bildverarbeitungs-basierte Bestimmung der lokalen Faserorientierung. Die Bestimmung der Faserorientierung mit einer Winkelgenauigkeit von besser als $\pm 4^\circ$ wiederum ermöglichte die zuverlässige Erkennung des Übergangs zwischen zwei benachbarten Schichten, um damit den Abtragsprozess stoppen oder die bearbeitete Geometrie verändern zu können, ohne die jeweilige Schichtdicke oder Zieltiefe im Voraus zu kennen.

Die Skalierung der Mikrobearbeitungsprozesse zu hohen mittleren Laserleistungen unter Beibehaltung der geforderten Qualität und Präzision ermöglicht einen hohen Durchsatz und das Erreichen der Zieltiefe in einer kurzen Prozesszeit.

Mit einem am Institut für Strahlwerkzeuge selbstgebauten Ultrakurzpuls-Laser mit einer mittleren Leistung von über 1 kW wurde das Laserabtragen von Silizium und

Metallen untersucht. Durch Anwendung geeigneter Bearbeitungsstrategien wie Bursts, niedrigen Bestrahlungen und hohen Scangeschwindigkeiten konnte der Durchsatz beim Abtragen bei gleichbleibend hoher Oberflächenqualität deutlich erhöht werden. Am Beispiel von Silizium konnte in dieser Arbeit die Volumenabtragsrate im Vergleich zum Stand der Forschung um mehr als den Faktor 224 auf $230 \text{ mm}^3/\text{min}$ gesteigert und gleichzeitig eine niedrige Rauheit von $\leq 0,6 \text{ }\mu\text{m}$ bis zu mehreren hundert Mikrometern Bearbeitungstiefe beibehalten werden. Mit derselben Strategie konnten auch hohe Volumenabtragsraten von $180 \text{ mm}^3/\text{min}$, $174 \text{ mm}^3/\text{min}$ und $126 \text{ mm}^3/\text{min}$ bei der Bearbeitung von Edelstahl, Aluminium und Kupfer erzielt werden.

Extended Abstract

Laser micromachining with short and ultrashort laser pulses enables particularly high precision and quality in the creation of a wide variety of geometries in the micrometre range on different materials. The range of processes and geometries extends from percussion drilling of microholes and engraving of grooves to laser micromilling of simple pockets or complex geometries. The depth or aspect ratio (depth/width) of the generated geometry usually has a major influence on the functionality of the respective application.

In this thesis, laser micromachining processes with target depth were investigated with regard to the three aspects of analytical modelling of the depth progress, depth-controlled micromachining and scaling of the throughput in volume ablation.

The analytical modelling of the depth progress enables to predict the machining depth depending on the process parameters which helps to design and plan a given process. Two analytical models were derived to calculate the depth progress of geometries with high aspect ratios (depth/width):

The model for percussion-drilled microholes is based on the assumptions of a conically-shaped hole, increasing absorptance with increasing aspect ratio due to diffuse multiple reflections within the hole and the assumption that the absorbed fluence increases linearly along the depth of the hole. The theoretical prediction of the model agrees well with experimental results for holes with a depth of up to 1.5 mm in stainless steel drilled with picosecond laser pulses.

The model for engraved grooves is based on the assumptions of a V-shaped groove, increasing absorptance with increasing aspect ratio due to specular multiple reflections within the groove, and the assumption that the absorbed fluence increases linearly along the depth of the groove. The theoretical prediction agrees well with the

experimental results for grooves with a depth of up to 624 μm in a Ti alloy engraved with femtosecond laser pulses.

Measuring and controlling the depth during micromachining ensures that the corresponding target depth is achieved by adjusting the process parameters. Depth-controlled material removal was realised in the present work by the in-situ measurement of the local depth using optical coherence tomography and the corresponding control of the beam source, and the potential was demonstrated by means of two applications:

Metal components generated by laser powder bed fusion usually require post-processing due to excess material from support structures, deviations from the targeted net shape and high surface roughness. Depth-controlled laser milling with ultrashort laser pulses enabled the locally adapted machining based on the measurement of the excess material. This made it possible to automatically remove block support structures and to reduce the shape deviation and surface roughness by 63% to 81% to 15 μm and 5 μm , respectively.

When repairing components made from carbon fibre-reinforced plastics (CFRP), it is necessary to remove the damaged areas with layer accuracy in preparation for rebuilding the component with precisely fitting repair layers. The in-situ measurement of the surface topography during laser milling of CFRP enabled the image processing-based determination of the local fibre orientation. The determination of the fibre orientation with an angular accuracy of better than $\pm 4^\circ$, in turn, enabled the reliable detection of the transition between two adjacent layers, so that the laser milling process could be stopped or the machined geometry changed between layers without knowing the respective layer thickness or target depth in advance.

Scaling the micromachining processes to high average laser powers while maintaining the required quality and precision enables high throughput and reaching the target depth in a short process time.

Laser milling of silicon and metals was investigated using an ultrafast laser with an average power of over 1 kW developed at the Institut für Strahlwerkzeuge. By applying suitable processing strategies such as bursts, low fluences and high scanning speeds, the throughput of laser milling could be significantly increased while maintaining high surface quality. For the example of silicon, the volume removal rate was

increased by more than a factor of 224 to 230 mm³/min compared to the state of the art while maintaining a low roughness of ≤ 0.6 μm up to a machining depth of several hundred micrometres. The same strategy was also used to achieve high volume removal rates of 180 mm³/min, 174 mm³/min, and 126 mm³/min when machining stainless steel, aluminium, and copper, respectively.

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

Goritz, 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 Umwandlungshärrens 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-Laser
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

Lasertiöten 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 Prozeßeffektivität
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

Griebsch, 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

Laserschweißignung 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 Strahlführungssystemen
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

Plaß, Wilfried

Zerstörschwellen 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.

Leistungskalierbares 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

Lasert 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

Bahnmüller, 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 Karoseriebau
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 Weichlötens 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 Dauertrichbetriebs 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

Krassel, 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

Schinzal, 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 3-8316-0256-5

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 3-8316-0460-8

Lasert in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Thomas Fuhrich

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

Daniel Müller

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

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheibenlaser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzverdopplung
2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahltschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokustrixtechnik
2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

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

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variabelm Laserstrahldurchmesser in modularen Fertigungssystemen
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 Lasermaterialbearbeitung
2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahltschweißen
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 Laserstrahltschweißen 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 Laserstrahltschweißen
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 Halbleiterscheibenlasers
2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

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

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierungen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung
2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breittling

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

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung
2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahltschweißen
2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse
2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyertt

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Tilman Froschmeier-Hans

Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsangepasster Stahlwerkstoffverbindungen
2014, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-4347-9

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügspalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4643-2

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

Stefan Piehler

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

Felix Abt

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

Volker Rominger

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

Thomas Rataj

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0

Michael Diez

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium
2018, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4737-8

Andreas Heider

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

Marcel Schäfer

Energetische Beeinflussung von Schmelzeffluss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl
2018, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-4742-2

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

Tom Dietrich

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern
2019, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4785-9

Martin Rumpel

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4801-6

Michael Eckerle

Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4804-7

Martin Stubenvoll

Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen
2019, 118 Seiten, ISBN 978-3-8316-4819-1

Christian Hagenlocher

Die Kornstruktur und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen
2020, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4864-1

Florian Fetzer

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahltiefschweißen mittels reduzierter Modelle.
2020, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-4874-0

Michael Jarwitz

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften.
2020, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4882-5

Christian Röhrer

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern
2020, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4888-7

Martin Sommer

Laserstrahlschweißen der Aluminiumlegierung AlMgSi mittels Strahloszillation
2021, 110 Seiten, ISBN 978-3-8316-4898-6

Birgit Weichert

Experimental Investigations on Power Scaling of High-Brightness cw Ytterbium-Doped Thin-Disk Lasers.
2021, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4914-3

Sebastian Faas

Oberflächenfunktionalisierung von Stahl mit UKP-Lasern mit mehreren Hundert Watt mittlerer Laserleistung.
2021, 95 Seiten, ISBN 978-3-8316-4935-8

Daniel Weller

Erhöhung der Prozesssicherheit beim Remote-Laserstrahlfügen von Aluminiumwerkstoffen.
2021, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4940-2

Sebastian Hecker

Verfahren zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern
2022, 132 Seiten, ISBN 978-3-8316-4955-6

Frieder Beirow

Leistungsskalierung ultrakurz gepulster radial polarisierter Laserstrahlung.
2022, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4970-9

Meiko Boley

Bestimmung und Regelung der Kapillar- und Nahttiefe beim Laserstrahlschweißen.
2022, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4986-0

Christoph Röcker

Flexible Verstärkung und Frequenzkonversion ultrakurzer Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2022, 182 Seiten, ISBN 978-3-8316-4987-7

Oliver Bocksrocker

Mechanismen der Entstehung von Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1 μm Wellenlänge
2023, 128 Seiten, ISBN 978-3-8316-4999-0

Daniel Förster

Energieeinkopplung und Energieumwandlungsprozesse bei der Bearbeitung von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen
2023, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-5009-5

Daniel Holder

Laser micromachining with target depth
2023, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-5010-1