

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

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

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

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

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

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen

von Dr.-Ing. Felix Abt
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.-Ing. Michael Schmidt

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., 2017

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 2017

ISBN 978-3-8316-4691-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Symbole und Abkürzungen	9
Kurzfassung der Arbeit	17
Extended Abstract	19
1 Einleitung	23
1.1 Ausgangslage	24
1.2 Zielsetzung	24
1.3 Gliederung der Arbeit	25
2 Messtechnische Grundlagen	27
2.1 Laserstrahlschweißen	27
2.2 Visuelle thermische Prozessemission	29
2.2.1 Entstehung der Wärmestrahlung	30
2.2.2 Emissionen der Dampfkapillare	33
2.2.3 Emissionen des Schmelzebades	34
2.3 Spektrale Eigenschaften der Prozessemissionen	35
2.3.1 Versuchsaufbau	35
2.3.2 Kalibrierung des Spektrometers	37
2.3.3 Versuchsplanung und Durchführung	40
2.3.4 Versuchsauswertung	41
2.3.4.1 Baustahl 1.0122 (S 235)	41
2.3.4.2 Edelstahl 1.4310 (X 10 Cr Ni 18 8)	44
2.3.4.3 Aluminium AA6012 (AlMgSiPb)	45
2.3.5 Extinktion im Schweißrauch	46
2.4 Konsequenzen für die Prozessvisualisierung	48
3 Prozess-Diagnostik mit Röntgen Video	49

3.1	Physikalische und technische Grundlagen	49
3.1.1	Abbildung mittels geometrischer Schattenprojektion	50
3.1.2	Absorption und Kontrast von Röntgenstrahlung	53
3.1.3	Signal-Rausch-Verhältnis	57
3.1.4	Röntgendetektoren	58
3.1.4.1	Direkte Röntgendetektoren	58
3.1.4.2	Indirekte Röntgendetektoren	59
3.1.4.3	Optische Kopplung von indirekten Röntgendetektoren	59
3.2	Aufbau des Röntgen-Systems	60
3.2.1	Röntgen-Video-Detektor und Röntgenröhre	61
3.2.2	Handling-System	64
3.2.3	Bildverarbeitung	66
3.2.3.1	Shading (Gain-Korrektur)	66
3.2.3.2	Helligkeit und Kontrast	69
3.3	Systemcharakterisierung	70
3.3.1	Ermittlung der Bildgütezahl mit dem Drahtsteg-BPK	70
3.3.2	Ermittlung der Bildgütezahl mit dem Stufe-Loch-BPK	73
3.4	Anwendung des Röntgen-Systems	77
3.4.1	Messung der Neigung der Kapillarfront	77
3.4.2	Beobachtung der Porenbildung	79
3.4.2.1	Prozessporen in Aluminium	79
3.4.2.2	Prozessporen in Stahl	81
3.4.3	Beobachtung von Schmelzebadströmungen	82
3.4.3.1	Eigenschaften von Tracern	82
3.4.3.2	Schmelzeströmungen (qualitativ) in Stahl und Aluminium	85
3.4.3.3	Schmelzeströmungen (quantitativ) in Aluminium	87
3.4.4	Visualisierung der Schmelzebadgrenze	89
3.4.5	Rekonstruktion des Schmelzebadvolumens	91
3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	94
4	Prozess-Überwachung	95
4.1	Aufbau der Prozessüberwachung	96
4.1.1	Optische Integration in den Prozess	96

4.1.2	Eigenschaften der Kamera.....	98
4.1.3	Bildakquise und Datenverarbeitung	101
4.2	Diagnostik der Fehlerentstehung	102
4.2.1	Versuchsaufbau	102
4.2.2	Versuchsplanung und Durchführung.....	104
4.3	Identifizierung signifikanter Bildmerkmale.....	106
4.3.1	Ungenügende Durchschweißung.....	106
4.3.2	Durchschussloch.....	111
4.3.3	Spritzer und Schmelzeauswürfe	114
4.3.4	Ungenügende Nahtbreite an der Oberfläche	116
4.4	Test der Prozessüberwachung.....	118
4.4.1	Ungenügende Durchschweißung.....	118
4.4.2	Durchschussloch.....	122
4.4.3	Spritzer und Schmelzeauswürfe	124
4.4.4	Ungenügende Nahtbreite an der Oberfläche	126
4.5	Bewertung der Methode.....	128
4.5.1	Vielseitigkeit.....	129
4.5.2	Erkennungssicherheit	130
4.5.3	Geschwindigkeit	132
4.5.4	Konsequenzen für die Prozessregelung.....	134
5	Prozess-Regelung	135
5.1	Stand der Wissenschaft und Forschung	135
5.2	CNN-Technologie.....	138
5.3	Visuelle Merkmalsextraktion.....	142
5.3.1	Algorithmus „One-Side“	146
5.3.2	Algorithmus „Omnidirectional“	148
5.4	Regelungstechnisches Modell.....	151
5.4.1	Messglied zur Ableitung von Mess- und Rückführungsgrößen.....	152
5.4.1.1	Arbeitspunkte und Verhalten der Messgröße	154
5.4.2	Regler und Regelstrategie.....	156
5.4.3	Regelstrecke.....	162
5.4.3.1	Verhalten der Regelstrecke.....	163

5.4.3.2	Abschätzung der minimalen Abtastfrequenz	166
5.5	Prototyp-Entwicklung	168
5.5.1	Kameraoptik.....	168
5.5.2	Steuerungseinheit.....	171
5.5.3	Echtzeitsoftware auf der CNN-Kamera.....	172
5.6	Patente	173
5.7	Test des Regelsystems.....	173
5.7.1	Closed-Loop Regelung der Durchschweißung.....	174
5.7.1.1	Kompensation der Vorschubgeschwindigkeit	176
5.7.1.2	Kompensation der Materialstärke	184
5.7.1.3	Kompensation der Fokusposition.....	190
5.7.1.4	Kompensation einer verschmutzten Optik.....	191
5.7.2	Closed-Loop Regelung der Einschweißung	192
5.7.2.1	Kompensation der Vorschubgeschwindigkeit	194
5.7.2.2	Einfluss des Spaltmaßes.....	196
5.8	Bewertung der Methode	200
5.8.1	Vollständige Durchschweißung.....	200
5.8.2	Einschweißung.....	201
5.8.3	Grenzen des Verfahrens.....	202
6	Zusammenfassung	203
7	Literaturverzeichnis	207
	Danksagung	221

Kurzfassung der Arbeit

Das Laserstrahl-tiefschweißen ist ein weit verbreitetes Verfahren in der industriellen Fertigung und obwohl bereits seit Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz, mangelt es bis heute an Möglichkeiten der Prozessregelung. Verfügbare Regelsysteme beschränken sich meist auf die Positions- oder Abstandsregelung, lassen den eigentlichen Schweißprozess jedoch in aller Regel außen vor. Bisherige Ansätze zur Regelung des Schweißprozesses scheiterten regelmäßig an zu geringer Messgeschwindigkeit oder nicht robust messenden Integraldetektoren.

Ogleich die Prozessüberwachung von Laserschweißprozessen bereits in vielen Bereichen Anwendung findet, handelt es sich auch hierbei meist um Verfahren mit integral messenden Detektoren, deren Messkurven lediglich über Korrelationsverfahren mit der erreichten Nahtqualität in Verbindung stehen. Kamerabasierte Verfahren zur Prozessüberwachung wurden zwar in den vergangenen Jahren massiv weiterentwickelt, abgesehen von Systemen zur Positionsüberwachung und -Regelung, kommen jedoch auch bei diesen meist Algorithmen zum Einsatz, die den Prozess auf Helligkeitsschwankungen hin untersuchen.

Die Verwendung von Bildverarbeitungsalgorithmen, welche auf der Auswertung von geometrischen Formparametern beruhen, ermöglichen eine weit robustere und aussagekräftigere Beurteilung des Prozesszustandes, als es die eingangs genannten helligkeitsbasierten Algorithmen vermögen. Der notwendige hohe Rechenaufwand verhindert jedoch bis dato die Nutzung solcher Algorithmen für ein echtzeitfähiges System zur Prozessregelung.

In dieser Arbeit wird basierend auf spektroskopischen Untersuchungen der elektromagnetischen Prozessemissionen und der Störeinflüsse durch Metaldampf und Schweißrauchpartikel, ein spektrales Fenster identifiziert, welches optimale Bedingungen für die Beobachtung der thermischen Prozessemission mit siliziumbasierten Kameras ermöglicht.

Grundlagenuntersuchungen mittels kombiniertem Einsatz von Röntgenvideotechnik und Hochgeschwindigkeitskameras im nahen und mittleren Infrarot, erlauben einen dreidimensionalen Einblick in den Schweißprozess, auch unterhalb der Schmelzbad-

oberfläche. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für die Entwicklung einer kamerabasierten Prozessüberwachung, welche über eine koaxial zum Bearbeitungslaserstrahl angeordnete Kamera, die thermische Strahlungsemission des Prozesses erfasst und die entstehenden Bilder anhand geometrischer Bildmerkmale auswertet. Die identifizierten Bildmerkmale beschreiben die jeweiligen transienten Fehler eindeutig und liefern eine Charakterisierung des Prozesszustandes.

Aus den evaluierten geometrischen Bildmerkmalen wird das Merkmal *Durchschweißloch* ausgewählt, um mittels eines geschlossenen Regelkreises den Durchschweißgrad von Lasertiefschweißprozessen zu regeln. Die Regelung wird dabei mittels einer neuartigen Rechnerarchitektur realisiert, der sogenannten *Cellularen Neuronalen Netze* (CNN). Die CNN-Architektur integriert dabei ein Netzwerk analoger Prozessoren direkt auf dem Kamerachip. Jeder einzelne Pixel verfügt bei diesem System über einen eigenen simplen Prozessor. Diese Architektur ermöglicht es durch die Vernetzung der einzelnen Pixel eine Bildverarbeitung direkt auf dem Kamerachip durchzuführen, deren Berechnungen innerhalb eines Belichtungszyklus abgeschlossen sind. Auf diese Weise wurde ein Regelsystem implementiert, welches mit Regelfrequenzen bis zu *14 kHz* bei minimaler Latenz, eine robuste Regelung der Durchschweißung und Einschweißung an I-Naht-Überlappverbindungen ermöglicht.

Extended Abstract

Deep-penetration laser welding is still an emerging application in the world of metal joining. It is increasingly replacing traditional resistance spot welding, particularly in automotive body construction, because of its higher productivity, lower costs and better quality. However, while process monitoring and control have found widespread use in classical joining processes, monitoring or closed-loop control of deep-penetration laser welding has only been established in a few applications so far.

Previously developed methods for direct in-process monitoring of laser welding processes were usually based on photo diodes. While allowing very high sampling rates, the spatial resolution of such systems is very limited. Camera-based systems on the other hand, offer a high spatial resolution but usually a very limited sampling rate, due to the limited bandwidth of the underlying data processing system. Both approaches are usually based on application-specific correlations between certain measuring signals and typical weld defects. Hence, the systems involved have to be calibrated to the specific application.

The goal of this work was the development of a fast, robust, camera-based, closed-loop control system for the penetration depth during laser welding. The emphasis of the work is on the overlap joint geometry commonly used in car body construction. This work includes process diagnostics and camera-based process monitoring to build up an accurate picture of the three-dimensional geometry of the welding process. This knowledge is crucial in order to achieve the goal of a non-correlation based measurement of the process characteristics, necessary for the development of a robust closed-loop control system.

Examination of spectral process emissions in the near infrared range below $1 \mu\text{m}$ enabled the identification of suitable wavelength ranges for process observation with silicon-based cameras detecting the thermal emission of the process itself. It is demonstrated within this work that conclusions drawn in many older publications have been based on measurements from uncalibrated spectrometers, leading to misinterpretation of various optical effects. By calibrated spectral measurement of the process emissions, two spectral windows free of characteristic line-emissions were identified for steel as well as for aluminium. Furthermore, it is shown that the spectral window be-

low 500 nm is not usable because of strong scattering effects in the welding plume. These scattering effects increase strongly with shorter wavelengths and cannot be avoided by using external illumination. Consequently the only practically usable spectral window for silicon-based cameras is between 650 nm and 1.000 nm . It should also be noted here that the dynamic range of silicon-based cameras is usually not sufficient for a simultaneous detection of the thermal emissions originating from both the key-hole and the weld bead. This is only possible in the infrared spectral range on the long-wavelength side of the thermal emission maximum of the welding process (above $3\text{ }\mu\text{m}$).

Investigation of capillary and melt pool dynamics in deep penetration laser welding processes was the next step. High-speed cameras in the visual and infrared spectrum range offer excellent image quality and high frame rates but access to the process details is limited due to the small surface area of the weld zone. With these conventional diagnostic techniques it is thus not possible to observe the key mechanisms inside the volume of the material which essentially determine the behaviour of the welding process. To gain insight into process phenomena such as the shape and movement of the capillary or the melt flow behaviour in the weld bead, X-ray videography is the ideal instrument. In this work the development and implementation of a high-speed X-ray video system is described, which enables the observation of internal process phenomena with high frame rates combined with outstanding spatial resolution.

A combined time-synchronous measurement system involving X-ray video and near infrared high-speed video was used to gather three-dimensional information about the geometry of the weld zone and its dynamic behaviour. It was possible to precisely measure the capillary depth and its dynamic movement as well as the direction and velocity of fluid flows inside the molten pool and their influence on pore formation. These findings are crucial for the understanding of possible limitations on the monitoring and controllability of deep-penetration laser welding in an industrial setting.

Investigations with high-speed cameras revealed important geometric information on the formation of different welding failures and possibilities for their distinct detection with a passive camera mounted on the welding head coaxially to the laser beam. The geometric image properties observed are directly linked to specific failure mechanisms and do not rely on simple correlations between standard measures and observed welding failures. The automatic recognition of characteristic geometric image-properties was performed by software algorithms developed in Matlab as a proof-of-concept. The robustness of the algorithms developed was tested in an extensive experimental study to identify possible candidates for the development of the closed-loop control system.

The so called full penetration hole (FPH) was identified as the most important image feature characterising the state of the process in terms of welding depth for a full penetration weld.

Using the aforementioned results it was possible to build up a camera-based closed-loop control system to ensure stable welding results even under changing welding conditions. Optical integration into the laser welding head was realised by means of a dichroitic beam-splitter to ensure a coaxial configuration of the camera's line of sight with the laser beam. This enables the system to be combined with two- or three-dimensional scanning heads in remote welding processes.

The key-technology to overcome the above mentioned performance issue of camera based control systems is a novel architecture called a "Cellular Neural Network" (CNN). With "Cellular Neural Networks" it is possible to integrate basic processor elements in the electronic circuitry of a CMOS camera resulting in a Single-Instruction-Multiple-Data (SIMD)-architecture on the camera chip itself. Such pixel-parallel systems provide extremely fast real-time image processing, since there is no need to transfer image data from the camera to a processor. The closed-loop control system developed in this work uses a CNN based camera surveying the contour of the full-penetration hole with a control frequency of up to 14 kHz for linear welding processes and up to 9 kHz for processes with variable welding trajectory, whereas the latency of the system is in the range of only one single frame.

An extensive experimental program was performed to validate the capabilities of the closed-loop control system. It was shown that the system is able to control the degree of full penetration in overlap joints with different steel grades. The closed-loop control successfully compensated for various external disturbances such as variations in material thickness and welding speed, as well as defocusing and the contamination of protective windows. These phenomena could be controlled with either linear or varying direction welding trajectories. Controlled full penetration welds are also possible in aluminum, but not with all alloys. In particular, the alloy AA5182 produces thermal camera images that are strongly disturbed by extensive fluctuations in brightness, which prevents reliable control. On the other hand, a closed-loop control of full penetration with the alloy group AA6000 is possible without difficulty.

In closed-loop controlled full penetration welding conditions there is no need for the otherwise obligatory 10% excess of laser power. This directly leads to a better quality of the root surface due to reduced spattering and smoke residue, as well as an energy saving or a corresponding gain in welding speed.

As well as optimizing full penetration, the control system is also able to maintain a stable penetration depth in a partial penetration condition during welding of overlap joints in different steel grades. This is due to the fact that the image feature FPH is also visible when the laser beam reaches the gap between the two welding parts, enabling the system to use this working point as a datum for closed-loop control. Stable closed-loop control of partial penetration welds in aluminum alloys could not be achieved in this work. Although the image feature itself was visible, the rate of false detection by the software algorithm was too high to ensure a stable operation.

In the partial penetration mode the weld seam does not penetrate through the lower sheet bottom surface. This reduces the need for subsequent machining and also provides higher resistance against corrosion in car body welding. The further decreased laser power in comparison to full penetration mode offers the possibility of higher welding speeds, leading to higher productivity and cost efficiency.

The limits of the camera-based closed-loop control system described in this work are basically due to the fact that the image feature of the full penetration hole (FPH) must be visible in the desired parameter field. This means also that a closed-loop control of an arbitrary welding depth, independent of the presence of any boundary surface, is generally not possible.

The first welding results using this closed-loop control system were presented at the ICALEO-conference 2008 in Temecula, CA, USA, and the fully developed control system was honored with the third place in the “Berthold Leibinger Innovation Award 2012” and the third place in the “Steel Innovation Award 2012”.

Laser 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 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 Fokusmatrixtechnik

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 vari-ablem 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 Nahteigen-schaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-len 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 La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

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 Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breiting

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 Laserstrahlschweißen

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

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 Fügespalt
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 978-3-8316-4638-8

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

