

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißiefen zwischen 1 mm und 10 mm

von Dr.-Ing. Andreas Heider
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. Siegfried Schmauder

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., 2018

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 2018

ISBN 978-3-8316-4738-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Formelzeichen und Abkürzungen	7
Kurzfassung der Arbeit	9
Extended Abstract	11
1 Einleitung	15
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit.....	15
1.2 Aufbau der Arbeit	16
2 Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer	18
2.1 Prozessgrenze der Einschweißtiefe.....	20
2.2 Prozessgrenze der Schweißnahtqualität.....	21
2.2.1 Spritzer und Schmelzauswürfe	22
2.2.2 Poren	24
2.2.3 Schwankungen in der Einschweißtiefe.....	26
2.2.4 Unregelmäßige Nahtzeichnung	27
2.2.5 Klassifizierung und Quantifizierung von Nahtdefekten.....	27
2.3 Werkstoffspezifische Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen	29
2.3.1 Wärmeleitfähigkeit	32
2.3.2 Absorption	33
2.3.3 Oberflächenbeschaffenheit und Werkstoffzustand.....	35
2.3.4 Zusammenführung der werkstoffspezifischen Einflussgrößen	36
2.4 Verfahrensspezifische Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen.....	36
2.4.1 Einfluss des Fokusedurchmessers	37
2.4.2 Einfluss der Fokusslage.....	43
2.4.3 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit und Laserleistung	43
2.4.4 Wirkungsgrade und Prozesseffizienz	48
2.5 Bewertung der Prozessgrenzen.....	52
3 Verhalten der Kapillare beim Laserstrahlschweißen	56
3.1 Röntgen-Systemtechnik für die Bewertung des Kapillarverhaltens.....	57
3.2 Charakteristische Geometrien der Dampfkapillare beim Schweißen.....	59
3.3 Verhalten der Dampfkapillare beim Prozessbeginn	61
3.4 Verhalten der Dampfkapillare während des Schweißprozesses	63
3.5 Verhalten der Dampfkapillare bei der Spritzerbildung	66
3.5.1 Bildung von kleinen Spritzern	67

3.5.2	Verhalten der Dampfkapillare bei der Entstehung von Schmelzauswürfen.....	69
3.5.2.1	<i>Modellvorstellung</i>	71
3.6	Verhalten der Dampfkapillare bei der Bildung von Poren	73
3.7	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf das Verhalten der Dampfkapillare .	75
3.8	Einfluss der Laserleistung auf das Verhalten der Dampfkapillare	77
3.9	Einfluss der Streckenenergie auf das Verhalten der Dampfkapillare	79
3.10	Auswirkung des Kapillarverhaltens auf die Nahtgeometrie	81
3.11	Interpretation zum Kapillarverhalten hinsichtlich der Prozessgrenzen	85
4	Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen.....	88
4.1	Zeitliche Änderung der Laserleistung (Leistungsmodulation)	89
4.1.1	Begriffsbestimmung	91
4.1.2	Verhalten der Kapillare bei der Leistungsmodulation.....	92
4.1.2.1	<i>Zulässige Einschweißtiefenschwankung</i>	95
4.1.2.2	<i>Einfluss der Modulationsfrequenz auf die Einschweißtiefe</i>	97
4.1.3	Einfluss der Leistungsmodulation auf die Anzahl der Nahtdefekte	99
4.1.3.1	<i>Einfluss der Modulationsfrequenz</i>	100
4.1.3.2	<i>Einfluss der Modulationstiefe</i>	101
4.1.3.3	<i>Einfluss der Schweißgeschwindigkeit</i>	102
4.1.3.4	<i>Einfluss des Fokusedurchmessers</i>	103
4.1.4	Auswirkungen der Leistungsmodulation auf die Nahtzeichnung	104
4.1.5	Zusammenführung der Ergebnisse der Leistungsmodulation	109
4.2	Steigerung der Laserleistung	114
4.2.1	Verhalten der Kapillare beim Schweißen mit Leistungen $P > 5$ kW ...	115
4.2.2	Einfluss der Laserleistung (> 5 kW) auf die Anzahl an Nahtdefekten.	120
4.2.3	Ausbildung der Nahtform beim Schweißen mit Leistungen > 5 kW ...	124
4.2.4	Zusammenführung der Ergebnisse mit Laserleistungen > 5 kW	125
5	Übertragung der Ergebnisse zur Erweiterung der Prozessgrenzen.....	130
6	Zusammenfassung	132
7	Literaturverzeichnis	136
8	Danksagung	145

Kurzfassung der Arbeit

Kupfer ist aufgrund seiner besonderen Materialeigenschaften (wie einer hohen Wärmeleitfähigkeit) in allen Bereichen der Elektromobilität, Elektrik und Elektronik ein unverzichtbarer Werkstoff. Damit einhergehend spielt die Fügetechnologie dieser Werkstoffe eine Schlüsselrolle für eine nachhaltige, effiziente und kostengünstige Produktion. Der Laserstrahl als Fügewerkzeug zum Schweißen hat sich bereits in zahlreichen industriellen Applikationen im Bereich der Stahl- und Aluminiumwerkstoffe etabliert. Die Prozessstabilität und die Reproduzierbarkeit beim Laserstrahlschweißen von Kupfer sind dahingegen insbesondere durch die stetig wachsenden Anforderungen an die Schweißverbindungen, wie einer reduzierten Wärmeeinbringung, einer geringen Spritzerbildung und steigenden Nahtquerschnittsflächen, derzeit noch unzureichend und einigen Prozessgrenzen ausgesetzt. Eine Prozessgrenze ist dabei immer dann erreicht, wenn die zuvor definierten Anforderungen an die Schweißnaht nicht mehr erfüllt werden. Als wesentliche Prozessgrenzen wurden eine Limitierung der erzielbaren Einschweißtiefe und eine geminderte Schweißnahtqualität identifiziert.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt im Erarbeiten eines grundlegenden Prozessverständnisses insbesondere im Hinblick auf die Prozessgrenzen, deren Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge und dem Identifizieren der Ursachen der Prozessgrenzen. Mit Hilfe von Online-Hochgeschwindigkeits-Röntgenuntersuchungen wurde das Kapillarverhalten während des Schweißvorgangs analysiert und hinsichtlich der Prozessgrenzen bewertet.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden aus den prozesstechnischen und physikalischen Ursachen für die Prozessgrenzen Strategien zur Erweiterung abgeleitet, entwickelt und umgesetzt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden werkstoffspezifische Eigenschaften (Absorption, Wärmeleitfähigkeit) und verfahrenstechnische Aspekte (Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit) als Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen identifiziert. Dabei wirken sich die Einflussgrößen in Form einer Limitierung auf die erzielbare Einschweißtiefe aus, welche maßgeblich durch die Laserleistung und die Schweißgeschwindigkeit bestimmt wird. Darüber hinaus äußern sich die Einflussgrößen durch die Bildung von Nahtdefekten (Spritzer, Schmelzauswürfe, Poren) in einer geminderten Schweißnahtqualität.

Es konnte eine Korrelation zwischen allen Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen (Einschweißtiefe und Nahtqualität) und dem Kapillarverhalten während des Schweißvorgangs beobachtet werden. Aus diesem Grund besteht die plausible Vermutung, dass

größtenteils das Kapillarverhalten für die ermittelten Prozessgrenzen verantwortlich ist.

Mit dieser Kenntnis lassen sich die Strategien einer Leistungsmodulation und die Verwendung von hohen Laserleistungen ($\gg 5 \text{ kW}$) zum Erweitern der Prozessgrenzen ableiten. Mit den umgesetzten Strategien ist es möglich qualitativ hochwertige Schweißnähte in Kupfer mit Einschweißiefen bis zu 10 mm zu erzeugen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen dazu bei das grundlegende Prozessverständnis beim Schweißen von Kupfer zu erweitern und stellen somit Grundlage für das Ableiten und die Entwicklung zukünftiger Strategien für einen zuverlässigen und robusten Laserstrahlschweißprozess in Kupfer dar.

Extended Abstract

The strong growth in electrification and the trend towards the electro mobility significantly increase the need for materials with high electrical and thermal conductivity such as pure copper (e.g. Cu-ETP) and many copper alloys. Beside the material properties an efficient and reliable joining technology combined with a high quality of the resulting joints is required for an economic production. Furthermore future trends show continuously enhanced requirements on the joints such as an increase of transferred currents (> 100 A). Therefore the joint cross sections and penetration depth of the joints have to be increased. In the recent years laser beam welding has become an established joining process especially for steel and aluminum materials. However, welding of copper is generally considered to be difficult, particularly due to its high heat conductivity and low absorptivity using laser sources with a wavelength of $1 \mu\text{m}$. With the currently commercially available laser sources with a maximum output power of ≤ 5 kW, welds in copper with penetration depths of several millimeters and a high quality (regarding the number of generated weld defects) of the resulting welds (without weld defects) are bounded by several process limits. Thereby a process limit is reached if the defined requirements cannot be satisfied.

The development of new process strategies to overcome the challenges of laser welding of copper requires a sound process understanding. Therefore the main focus in the present work is to identify the process limits of copper welding and to develop a fundamental process understanding of the influencing parameters and cause-effect relations on the process limits. With this background strategies to expand the process limits are developed and transferred.

To analyze the influence of heat conduction, a copper alloy (bronze, CuSn6) and a pure copper (Cu-ETP) with high heat conductivity were used for the experiments.

As one result of the present work the main process limits could be identified as the penetration depth and the resulting weld quality. Two determining factors on the process limits were figured out. On the one hand the absorptivity and the heat conductivity (material dependent factors) were identified as influencing parameters on the process limit. On the other hand the welding process is affected by the laser power and the welding speed (procedural factors). One result of the influencing factors is the generation of weld defects (spatters, pores, melt ejections) which is directly correlated to the resulting weld quality. Thereby a permanent interaction of the determined influencing factors can be seen.

With the results of the fundamental investigations regarding the process limits the major influencing factors were analyzed and evaluated separately. The deep-penetration

threshold limits the required penetration depth. The deep-penetration threshold is strongly related to the low absorptivity and high heat conductivity of copper. The power threshold to exceed the deep-penetration threshold was investigated as a function of the focal diameter and the welding speed. To reach penetration depths of several millimeters using currently commercially available laser sources with an output power of $P \leq 5$ kW it was found that focal diameters $d_f \leq 200 \mu\text{m}$ are necessary. Using focal diameters of $d_f \geq 600 \mu\text{m}$ in combination with a laser power of $P \leq 5$ kW only heat conduction welding with penetration depth $s \ll 1$ mm can be reached. The achievable penetration depth is given due to a combination of the used laser power and the welding speed. Furthermore the relation of laser power and welding speed directly influences the resulting weld quality (regarding the amount of generated weld defects) and affects the process limit, respectively.

With the results of the investigations it could be shown that with a given laser power ($P < 5$ kW) welding speeds of less than $v = 10$ m/min are necessary to produce welds with penetration depths of $s > 1$ mm. However, laser welding of copper at welding speeds of less than $v = 10$ m/min frequently shows numerous weld defects such as pores, spatter formation, fluctuations in penetration depth and holes in the weld seam. Therefore the welding speed and the laser power could be identified as influencing parameter on the process limit. The higher the welding speed and the higher the laser power, the lower the number of generated weld defects.

Capillary instabilities during welding are known to be one cause for weld defects. In addition the welding depth in deep-penetration welding is mainly determined by the capillary depth. Hence the process limits (weld quality and penetration depth) seem to be influenced by the capillary. With this background in combination with the results of this work the central hypotheses of this work can be expressed:

The main reason for the process limits imposed by the seam quality and the welding depth is attributed to the behavior of the capillary.

One of the central approaches of the present work is to identify the reasons of the process limits and therefore to verify the hypotheses. With the use of online X-ray investigations the reasons of the process limits could be related to the temporal and special behavior of the capillary. With X-ray imaging it could be shown that the formation of bubbles at the tip of the capillary is correlated to the formation of melt ejections and pores. In addition the formation of spatters, the fluctuation in penetration depth and the resulting shape of the cross section of the weld seam could also be correlated to the behavior of the capillary.

With the enhanced fundamental process understanding it was possible to derive suitable approaches to expand the process limits of copper welding and to derive strategies to reach high quality welds with penetration depth of $s > 1$ mm. In this work two dif-

ferent approaches were followed. On the one hand using a fast temporal oscillation of the laser power (laser power modulation) to stabilize the welding of copper and therefore to reduce weld defects was investigated. On the other hand the approach of using a higher laser power of up to 16 kW was adopted.

It is demonstrated that the modulation of the laser power with the appropriate parameters significantly improves the weld quality and therefore expands the process limit. High-speed X-ray imaging of power-modulated welds was used to investigate the key-hole dynamics and bubble formation during power-modulation. The formation of bubbles at the tip of the capillary could be prevented by power-modulation leading to almost defects free welds. The influence of the average power, the modulation amplitude, welding speed, focal diameter, and modulation frequency on the welding quality is discussed. It is shown that a simple modulation of the laser power with an appropriate normalized modulation frequency (ratio between modulation frequency, focal diameter and welding speed) of about $\Lambda = 0.2$ to $\Lambda = 0.4$ and power modulation depths (ration between amplitude and average power) of $\Pi > 80\%$ very effectively reduces the number of weld defects. In addition the penetration depth could be increased by up to 30 % using laser power modulation.

The second approach to reach high quality welds with penetration depth of $s > 1$ mm was using a higher laser power of up to 16 kW. High quality welds with penetration depth of up to 10 mm could be achieved with the use of a laser power of > 5 kW. With these investigations a precise process limit between poor-quality welds and high-quality welds could be identified. The boundary value was found as the ratio of 2.2 kW laser power for one millimeter penetration depth. Above this threshold high-quality welds without weld defects can be produced. Below this boundary only welds with poor-quality are achieved. For welding of copper a suitable approach to reach high quality welds in combination with penetration depth of $s > 1$ mm could be shown with the use of laser power of > 5 kW.

With the results of this work it is possible to weld copper with penetration depths of several millimeters in combination with high-quality weld results. Furthermore this work contributes to an enhanced process understanding of the welding of copper and to expand the process limits. This work provides a basis to derive and develop future strategies for an effective, reliable and robust laser welding process of copper.

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 Fert-igungssystemen

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 Nahteigenschäften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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

Mikhail Larionov

Kontakterion 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 Getriebekonstruktion – 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

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 Einschweißiefen zwischen 1 mm und 10 mm
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5