

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern

von Dr.-Ing. Tom Dietrich
Universität Stuttgart



München

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

Hauptberichter: Prof. Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Prof. Dr. rer. nat. Alois Herkommer

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., 2019

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 © utzverlag GmbH 2019

ISBN 978-3-8316-4785-9

Printed in Germany

utzverlag GmbH, München

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Liste der verwendeten Symbole	7
Kurzfassung	10
Extended Abstract	13
1 Einleitung	16
1.1 Motivation und Ziel	16
1.2 Struktur der Arbeit	20
2 Optische Elemente zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern	21
2.1 Stabilisierung und Selektion der Wellenlänge und der Polarisation im Scheibenlaser	21
2.2 Gitterwellenleiterspiegel	23
2.2.1 Resonant-Reflection GWS	25
2.2.2 Resonant-Diffraction GWS	29
2.2.3 Leaky-Mode GWS	32
3 Resonatorinterne Frequenzverdopplung	35
3.1 Überblick und Zielsetzung	35
3.2 Auslegung und optische Eigenschaften des eingesetzten GWS	37
3.3 Multimodebetrieb des bei 940 nm gepumpten Lasers	42
3.4 Multimodebetrieb des bei 969 nm gepumpten Lasers	54
3.5 Grundmodebetrieb des bei 969 nm gepumpten Lasers	61
3.6 Zusammenfassung	73
4 Resonatorinterne Erzeugung radial polarisierter Laserstrahlung	74
4.1 Überblick und Zielsetzung	74
4.2 Auslegung und optische Eigenschaften des eingesetzten GWS	76
4.3 Experimenteller Aufbau	80
4.4 Betrieb des bei 969 nm gepumpten Lasers	83

4.5	GWS als Auskoppelspiegel	87
4.6	Zusammenfassung	91
5	Strahllagestabilisierung im Scheibenlaser	92
5.1	Thermisch induzierte Wellenfrontstörungen im Scheibenlaser	92
5.2	Thermisch induzierte Konvektion	94
5.3	Strahllagestabilisierung mittels resonatorintern eingesetztem GWS	99
5.4	Auslegung und optische Eigenschaften des eingesetzten GWS	103
5.5	Experimenteller Aufbau	103
5.6	Betrieb des bei 969 nm gepumpten Lasers	105
5.7	Betrieb des bei 940 nm gepumpten Lasers	116
5.8	Zusammenfassung	126
6	Zusammenfassung	128
	Literaturverzeichnis	132
	Danksagung	143

Kurzfassung

Die gezielte Änderung, Anpassung oder Beeinflussung der Eigenschaften eines Laserstrahls, die sogenannte *Strahlformung*, steht kontinuierlich im Fokus von Forschung und Entwicklung. Dabei werden mithilfe von optischen Komponenten die Eigenschaften eines Laserstrahls, sei es die spektrale Zusammensetzung oder die Polarisationsverteilung, gezielt verändert, angepasst und stabilisiert. Um die Verluste durch den Strahlformungsprozess gering zu halten, kann die Manipulation der Eigenschaften des Laserstrahls durch geeignete hochleistungsfähige und verlustarme Komponenten bereits bei seiner Entstehung innerhalb des Laserresonators vorgenommen werden. Gängige Komponenten, welche zur Stabilisierung und Beeinflussung der spektralen Zusammensetzung und der Polarisation des erzeugten Laserstrahls in den Resonator eingebracht werden können, leiden jedoch oftmals an niedrigen Zerstörschwellen oder unwirtschaftlicher Komplexität und führen im Laserbetrieb zu hohen optischen Verlusten sowie störenden thermo-optischen Effekten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der Untersuchung alternativer hochleistungstauglicher Komponenten zur resonatorinternen Strahlformung. Diesbezüglich wird das Konzept der *Gitterwellenleiterspiegel* (GWS) vorgestellt. Diese Komponenten bestehen aus einer Kombination aus Gitterstruktur und dielektrischem Schichtstapel und nutzen den Kopplungsmechanismus eines einfallenden elektromagnetischen Feldes an Moden in den durch den Schichtstapel gebildeten Wellenleiter. Dabei ist der Kopplungseffekt, je nach Auslegungsform der Gitterwellenleiterstruktur, abhängig von der Wellenlänge und der Polarisationsrichtung des einfallenden Feldes. Über die Kopplung an die Wellenleitermoden können gezielt Eigenschaften des oszillierenden Laserstrahls manipuliert und folglich resonatorintern Strahlformung betrieben werden. Ziel dieser Arbeit war es anhand unterschiedlicher Experimente die Hochleistungstauglichkeit bestehender und neuer GWS-Ansätze im Scheibenlaser zu untersuchen.

So wurde im ersten Experiment ein GWS in Littrow-Konfiguration zur Stabilisierung der Phasenanpassungsbedingung eines frequenzverdoppelnden Scheibenlasers eingesetzt. Im Multimode-Betrieb ($M^2 \approx 20$, SPP = 3,4 mm · mrad) konnte eine

Ausgangsleistung von mehr als 1 kW bei einer Wellenlänge von 515 nm und einer optischen Effizienz von 51,6% (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 969 nm) sowie 46,0% (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 940 nm) demonstriert werden. Die maximale Leistungsdichte des oszillierenden Laserstrahls auf der Oberfläche des GWS betrug ca. 40 kW/cm^2 . Die Hochleistungstauglichkeit des GWS wurde zusätzlich anhand eines im Grundmode betriebenen resonatorinternen frequenzverdoppelnden Scheibenlasers bestätigt. Hierbei wurde eine maximale Ausgangsleistung von 419 W bei einer Wellenlänge von 515 nm und einer optischen Effizienz von 45,4% (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 969 nm) erreicht. Die gemessene Beugungsmaßzahl des erzeugten Laserstrahls betrug bei maximaler Ausgangsleistung $M^2 < 1,36$. Der eingesetzte GWS blieb trotz einer Leistungsdichte von bis zu 60 kW/cm^2 unbeschädigt.

In einem weiteren Experiment konnte die Erzeugung radial polarisierter Laserstrahlung mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich anhand eines in den Resonator integrierten GWS demonstriert werden. Dazu wurde eine neue Generation von GWS auf Basis der Kopplung eines einfallenden Strahls an verlustbehaftete Wellenleitermoden entwickelt, welche sich durch eine hohe spektrale Bandbreite der Separation der Reflektivität für TE- und TM-polarisierte Strahlung ($\geq 20\%$) von über 70 nm auszeichnet. Bei einer Wellenlänge von 1030 nm betrug der Unterschied der Reflektivität des GWS für einen TM- und TE-polarisierten Strahl ca. 45%, wobei eine Reflektivität für TM-polarisierte Strahlung von $(99,8 \pm 0,2)\%$ gemessen wurde. Der Durchmesser der Gitterstruktur betrug 16 mm. Integriert in einen cw-betriebenen Scheibenlaserresonator wurde ein radial polarisierter Laserstrahl mit einer maximalen Ausgangsleistung von 980 W erzeugt. Der optische Wirkungsgrad des Lasers betrug bei maximaler Ausgangsleistung 50,5%. Für den demonstrierten Leistungsbereich betrug der Polarisationsgrad des erzeugten radial polarisierten Laserstrahls durchgehend $> 95\%$. In Bezug auf den Stand der Technik zum Zeitpunkt dieser Arbeit konnte die demonstrierbare Ausgangsleistung um einen Faktor von ca. 3,5 gesteigert werden.

Im dritten Experiment wurde ein GWS zur resonatorinternen Strahlgestabilisierung im Scheibenlaser eingesetzt. Dabei konnten die optischen Auswirkungen von Wellenfrontstörungen, welche aufgrund thermisch induzierter Konvektion an der ungekühlten Frontseite des Laserkristalls auftreten und die maximal erreichbare Ausgangsleistung eines im Grundmode betriebenen Scheibenlasers üblicherweise limitieren, effizient kompensiert werden. Die passive Strahlgestabilisierung wird in Littrow-Konfiguration erreicht, sofern die Gitterlinien senkrecht zur Richtung

der auftretenden Konvektion orientiert werden. In dieser Orientierung bewirkt eine Verkippung des oszillierenden Strahls durch die auftretende Konvektion an der Laserscheibe, dass sich der Einfallswinkel auf dem GWS ändert. Dies hat zur Folge, dass der Laser spektral auf die Wellenlänge ausweicht, welche durch die Littrow-Bedingung bei geändertem Einfallswinkel vorgegeben wird und gleichzeitig die größte Verstärkung erfährt. Dieser passive Effekt bewirkt, dass die geometrische Lage des oszillierenden Laserstrahls auf dem optisch angeregten Bereich des Laserkristalls stabilisiert wird. Verglichen mit einem Referenzexperiment ohne passive Strahl-lagestabilisierung konnte in den durchgeführten Experimenten durch Integration des GWS in den Resonator die Ausgangsleistung eines im Grundmode betriebenen Scheibenlasers mehr als verdreifacht (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 969 nm), bzw. mehr als verdoppelt (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 940 nm) werden. Sowohl die Strahl-lagestabilität als auch die Langzeitstabilität der Ausgangsleistung des Lasers ließen sich durch den resonatorinternen Einsatz des GWS verbessern.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass durch Integration von Gitterwellenleiterspiegeln in Scheibenlaserresonatoren effizient Strahlformung betrieben werden kann. Da trotz resonatorinterner Leistungen im mehrstelligen kW-Bereich die Zerstörschwelle der Komponenten nicht erreicht wurde und keine störende thermo-optische Effekte auftraten, konnte die Hochleistungstauglichkeit dieser Elemente erfolgreich bestätigt werden.

Extended Abstract

Many industrial applications benefit from the use of laser beams with specified temporal and spatial properties. Although the technology of *laser beam shaping* is mainly associated with controlling the intensity and phase profile of the output of a laser, it can further contain stabilization and control of the oscillating polarization and spectral composition. In many cases, beam shaping components are implemented outside the laser resonator. Alternatively, shaping the beam inside the cavity can be more desirable than reshaping outside the cavity due to the introduction of additional external losses and adjustment problems. More elements are required outside the cavity which leads to additional costs and larger physical systems. Furthermore, intra-cavity beam shaping offers the possibility to generate laser beams with tailored properties at high extraction efficiencies. However, state-of-the-art intra-cavity beam shaping elements for the stabilization and selection of the oscillating wavelength and polarization (e.g. Brewster plates, thin-film polarizers or etalons) suffer from thermally-induced effects, high complexity or low damage threshold and introduce additional losses in transmission or reflection. Therefore, alternative approaches with high-power suitable components for intra-cavity laser beam shaping are of great interest in a number of industrial and scientific areas.

Within this work a high-power suitable approach based on grating waveguide mirrors (GWM) was investigated for the intra-cavity stabilization and selection of the oscillating polarization and wavelength. Such GWMs consist of a combination of dielectric layers and sub-wavelength diffraction grating structures. Its principle is based on the resonant reflection, resonant diffraction or leaky-mode excitation effect. Used as folding mirror, output coupler or end-mirror inside a laser cavity, it provides unique features to efficiently stabilize the polarization state, the spectral bandwidth and the wavelength of the laser emission. Different kinds of GWMs have been investigated. Integrated into high-power thin-disk laser setups, the high-power suitability of the GWMs was studied within three different experimental investigations.

The first chapter describes the application of GWMs for the generation of continuous-wave, intra-cavity frequency-doubled laser radiation in thin-disk lasers. Output powers of up to 1.1 kW (multi-mode operation, M^2 approx. 20) at a wavelength of 515

nm were achieved at an unprecedented optical efficiency of 51.6% (pumped at 969 nm) and 46.2% (pumped at 940 nm) with respect to the pumping power of the thin-disk laser. In fundamental-mode operation, an output power of 419 W was achieved when pumping at a wavelength of 969 nm with an overall optical efficiency of 45.5%. In this latter case, the beam quality factor was measured to be $M^2 < 1.36$. In order to scale the output and the efficiency of intra-cavity frequency-doubled continuous-wave thin-disk lasers, grating waveguide mirrors were used for the stabilization of the wavelength, for spectral narrowing as well as for the polarization selection, respectively, which is necessary for a stable and efficient second-harmonic generation. The GWM was operated in Littrow configuration and exhibited diffraction efficiencies exceeding 99.8%. The presented laser setup benefits from the advantage of a GWM combining both features (wavelength and polarization selection) in one single reflective device (as compared to the use of conventional intra-cavity elements) and therefore reducing both round-trip losses as well as thermally induced effects.

In addition to the influence of the wavelength of the laser, an optimized polarization distribution further improves the absorption of the laser radiation in material processing and therefore significantly influences the overall process efficiency. In the past decade, a variety of scientific groups demonstrated applications for radially or azimuthally polarized laser beams in laser material processing. As compared to other polarization states, beneficial properties of radial polarization for cutting metal sheets were predicted. Experimental investigations indicate additional benefits for further material processing applications such as drilling and deep-penetration welding, which have been demonstrated to lead to an increase of process efficiency and quality by using such a polarization state. To address these applications the generation of kW-class, continuous-wave, radially polarized laser radiation in an Yb:LuAG thin-disk laser was investigated. Output powers of up to 980 W were achieved with an optical efficiency of 50.5% with respect to the incident pump power of the TDL. The degree of radial polarization was measured to be 95.5% at maximum output power. This was achieved by the integration of a new generation of broadband, large-area GWM with an unprecedented high polarization discrimination of approx. 45% at a wavelength of 1030 nm as the end-mirror in the TDL resonator. The GWM is based on the leaky-mode coupling mechanism, which allows sufficient reduction of the reflectivity for radiation of a given polarization state (radial or azimuthal).

The third chapter describes a passive beam stabilization approach based on GWMs to compensate for the alignment instability caused by air convection in a thin-disk laser. In general, wavefront distortions caused by the convection of heated ambient

air in front of the laser crystal induce severe pump-power-dependent misalignment in laser resonators. This effect is particularly pronounced in fundamental mode operation and limits the output power when no realignment of the resonator is possible during operation. While the spherical contribution, the actual *thermal lens*, of the thermal distortions induced in the laser crystal can be compensated for, e.g. by using deformable mirrors or can be taken into account by the resonator design to a certain degree, thermally induced wavefront distortions caused by the convection of the ambient air or gas in front of the heated disk surface are severely limiting factors. In this thesis, a new approach to passively compensate for this misalignment instability by exploiting the spectral dispersion of a highly efficient grating-waveguide mirror used as a cavity end-mirror in Littrow-configuration is presented. By means of such a compensation scheme, it was possible to almost triple the achievable output power of a fundamental mode thin-disk laser pumped at wavelengths of 969 nm or 940 nm, respectively, when compared to the setup without this means of compensation. The stability of output power and beam pointing were significantly increased by means of the GWS.

In summary, the GWMs presented in this thesis have proven suitable in high-power laser systems thanks to the high optical performance, low complexity of integration in laser cavities and high damage threshold. The presented elements offer a cost-effective and above all powerful solution for the application of intra-cavity laser beam shaping. The findings are used as a basis for commercialization of the components and further research activities.

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 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 Heißrisen 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

Marcel Schäfer

Energetische Beeinflussung von Schmelzefluss 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