

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern

von Dr.-Ing. Stefan Piehler
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. Thomas Graf
Mitberichter: 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., 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 978-3-8316-4690-6

Printed in Germany

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

Inhalt

Inhalt	5
Liste der verwendeten Symbole	7
Kurzfassung	13
Extended Abstract	15
1 Einleitung	21
1.1 Skalierungsproblematik bei hochbrillanten Scheibenlasern	21
1.2 Deformierbare Spiegel für den resonatorinternen Einsatz	26
1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit	29
2 Grundlagen	31
2.1 Thermische Effekte im Scheibenlaserkristall	31
2.2 Wellenfrontstörungen im Scheibenlaserkristall	36
2.3 Methoden zur Resonatormodellierung	42
2.4 Auswirkung resonatorinterner Wellenfrontstörungen	46
2.4.1 Sphärische Wellenfrontstörungen	47
2.4.2 Asphärische Wellenfrontstörungen	49
3 Resonatorinterne Kompensation von Wellenfrontstörungen	53
3.1 Kompensation sphärischer Wellenfrontstörungen	54
3.2 Kompensation asphärischer Wellenfrontstörungen	56
4 Flächenlastspiegel für den resonatorinternen Einsatz	63
4.1 Flächenlastspiegel - Grundprinzip und Auslegung	63
4.2 Sphärische Flächenlastspiegel	67
4.2.1 Auslegung	68
4.2.1.1 Sphärische Flächenlastspiegel homogener Dicke	68
4.2.1.2 Sphärische Flächenlastspiegel mit optimierter Di- ckenverteilung	70
4.2.2 Charakterisierung	74
4.2.2.1 Sphärische Flächenlastspiegel mit homogener Dicke	76

4.2.2.2	Sphärische Flächenlastspiegel mit optimierter Dickenverteilung	80
4.3	Asphärische Flächenlastspiegel	86
4.3.1	Auslegung	86
4.3.2	Charakterisierung	91
5	Experimentelle Demonstration der resonatorinternen Störungskompensation	96
5.1	Sphärische Kompensation	97
5.2	Asphärische Kompensation	106
5.3	Kombinierte sphärische und asphärische Kompensation	114
6	Zusammenfassung und Ausblick	123
	Literaturverzeichnis	129
	Danksagung	136

Kurzfassung

Die Leistungsskalierung von Scheibenlasern hoher Brillanz ist durch thermisch induzierte Wellenfrontstörungen im Scheibenlaserkristall limitiert. Durch die sphärische Komponente dieser Wellenfrontstörungen wird - analog zur klassischen „thermischen Linse“ - eine Abhängigkeit der Strahlqualität von der Pumpleistung hervorgerufen, durch die asphärische Komponente entstehen hauptsächlich pumpleistungsabhängige Beugungsverluste. Durch Verringerung der im laseraktiven Medium erzeugten Wärmelast, beispielsweise durch Optimierung der Kühlung oder Zero-Phonon-Pumpen, lassen sich diese Störungen betragsmäßig zwar verringern, Ausgangsleistungen im kW-Bereich mit beugungsbegrenzter Strahlqualität über den gesamten Leistungsbereich sind allerdings ohne Kompensation der thermisch induzierten Wellenfrontstörungen nicht möglich.

Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der resonatorinternen Kompensation dieser charakteristischen Wellenfrontstörungen. Ziel war es, mittels geeigneter deformierbarer Spiegel im Resonator eine Kompensation der beiden Komponenten der Wellenfrontstörungen zu erreichen, so dass bei Ausgangsleistungen im Kilowatt-Bereich eine beugungsbegrenzte Strahlqualität erreicht werden kann, die von der Pumpleistung unabhängig ist.

Hierfür wurden auf dem Flächenlastprinzip basierende Spiegel eingesetzt, deren Deformation durch Anlegen eines pneumatischen Drucks an eine dünne Spiegelmembran erzeugt wird. Auf Basis der Kirchhoff'schen Plattentheorie wurden die Dickenverteilungen der Spiegelmembranen so ausgelegt, dass die resultierende Deformation jeweils einer Komponente der Wellenfrontstörungen entspricht. Anhand von interferometrischen Messungen der Oberflächendeformation der entwickelten sphärisch und asphärisch deformierbaren Spiegel bei unterschiedlichen Drücken konnte gezeigt werden, dass die Oberflächenform der jeweiligen Spiegeltypen in sehr guter Näherung den angestrebten Sollverformungen entspricht. Der Einsatz der beiden Spiegeltypen in unterschiedlichen Resonatoren hat darüber hinaus gezeigt, dass auch die Beschichtungsqualität der deformierbaren Spiegel den Anforderungen an Resonatorspiegel genügt.

Für Ausgangsleistungen bis zu ca. 1 kW konnte gezeigt werden, dass der resonatorinterne Einsatz eines sphärisch deformierbaren Spiegels eine Einstellung und Stabilisierung der Strahlqualität ermöglicht. Der asphärische Spiegel bewirkt einerseits eine Kompensation der entsprechenden asphärischen Anteile der thermisch induzierten Wellenfrontstörungen, andererseits wurde darüber hinaus eine Stabilisierung gegenüber Instabilitäten der Modenposition auf der Scheibe beobachtet. Insgesamt konnte für ein Zero-Phonon-gepumptes Scheibenlasersystem eine Ausgangsleistung von 1077 W bei einer Beugungsmaßzahl von $M_R^2 = 1,23$ (bzw. $M_x^2 = 1,27$ und $M_y^2 = 1,19$) gezeigt werden, wobei durch den sphärischen Flächenlastspiegel eine Stabilisierung der Strahlqualität auf $M^2 < 1,5$ über den gesamten Leistungsbereich demonstriert wurde.

Für ein breitbandig bei 940 nm gepumptes Scheibenlasersystem konnte durch gleichzeitigen Einsatz eines sphärischen und eines asphärischen Flächenlastspiegels eine Ausgangsleistung von 1036 W bei einer Beugungsmaßzahl von $M_R^2 = 1,29$ erreicht werden. Auch hier konnte mittels des sphärischen Flächenlastspiegels die Beugungsmaßzahl stabilisiert und mit $M^2 < 1,3$ nahezu beugungsbegrenzt und über den gesamten Leistungsbereich konstant gehalten werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass Flächenlastspiegel eine effektive Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen innerhalb des Laserresonators ermöglichen. Besonders vielversprechend erscheint die Kombination dieses Kompensationsansatzes mit einer zusätzlichen Verringerung der Wärmelast im laseraktiven Medium, die beispielsweise durch Zero-Phonon-Pumpen erreicht werden kann. Hierdurch sollten sich Grundmode-Scheibenlaser im Multi-kW Bereich realisieren lassen, deren Strahlqualität über den gesamten Leistungsbereich konstant und nahezu beugungsbegrenzt ist.

Extended Abstract

Power scaling of high-brightness solid-state lasers is limited by wavefront distortions caused by thermal effects in the laser crystal. The magnitude of these pump-power dependent aberrations is significantly reduced for thin-disk lasers owing to the efficient cooling concept. However, when it comes to fundamental-mode operation, even the comparably weak residual wavefront distortions in thin-disk laser crystals have significant impact on output power and beam quality. By optimization of the cooling of the laser crystal or pumping at the zero-phonon-line, the heat load and hence the magnitude of thermally induced wavefront distortions can be further reduced. Accordingly, output powers in the kW-range have been demonstrated with almost diffraction-limited beam quality at a specific operating point of the laser. However, it is not possible to constantly maintain diffraction-limited beam quality throughout the full power range without effective compensation of the thermally induced wavefront distortions in the thin-disk laser crystal.

This thesis aims at the development of a suitable method for the compensation of thermally induced aberrations in thin-disk lasers. The approach pursued for this purpose is the intra-cavity use of deformable mirrors designed for the compensation of the characteristic wavefront distortions present in thin-disk lasers. The main objective is the demonstration of a kW-level thin-disk laser with almost diffraction-limited and above all constant beam quality throughout the full power range.

The basic shape of thermally induced wavefront distortions generated in pumped thin-disk laser crystals is well-known from literature. In general, these aberrations can be separated in a spherical and an aspherical component. The spherical component leads to a dependency of beam quality of the output beam on pump power, in analogy to the “thermal lensing”-effect known from other types of solid-state lasers. The aspherical component causes a slight degeneration of beam quality, but mainly generates diffraction losses which reduce the overall efficiency and can lead to a suppression of the laser oscillation especially in fundamental-mode operation. Although both effects can be reduced by a decrease of heat load in the laser crystal, they cannot be suppressed completely. Therefore, intra-cavity compensation of these distortions inevitably becomes necessary beyond some point.

The compensation of the spherical component of the thermally induced wavefront distortions can be achieved by using a spherically deformable mirror featuring a controllable refractive power. Accordingly, an aspherically deformable mirror can be used for the compensation of the aspherical wavefront distortions, if the phase modulation generated by the mirror is exactly inverse to the wavefront distortion. The spherical mirror can be placed at an almost arbitrary position within the laser cavity, whereas some restrictions apply for the position of the aspherical mirror. As a deformable mirror is a phase-only modulator, perfect compensation of wavefront distortions can only be achieved if the compensating mirror is placed in a conjugate plane of or close to the source of the distortion, so that the change of the intensity distribution of the distorted wave caused by propagation is negligibly small. If these conditions are met, an effective intra-cavity compensation of the aspherical wavefront distortions can be achieved by using a deformable mirror which induces a phase distortion which is the inverse of the shape of the a priori known wavefront distortions generated in the thin-disk laser crystal. The diffraction losses caused by the aspherical component of the thermally induced wavefront distortions hence can be effectively reduced. This could be verified in this thesis using a diffractive model of a thin-disk laser cavity.

As the gain in thin-disk laser crystals is usually very small in comparison to e.g. rod- or fiber-shaped gain media, laser operation is very sensitive to cavity losses. Therefore, for the use in high-power resonators, the deformable mirrors should feature a very high reflectivity in the range of $R > 99.95\%$. Furthermore, for an effective compensation of wavefront distortions, the deviations of the mirror surface from the ideal shape should be negligibly small, i.e. preferably less than $1/20$ of the laser wavelength. The approach for the implementation of such high-quality mirrors chosen in this thesis is the concept of deformable mirrors based on the deformation of a thin membrane caused by a distributed surface load, i.e. pneumatic or hydraulic pressure, as this type of mirrors has shown promising performances in previous experiments. With only one degree of freedom, however, a “surface-load deformable mirror” (SLDM) has to be designed specifically for the targeted application. It is therefore beneficial to make use of the separability of spherical and aspherical wavefront distortions and compensate for these distortions separately using two discrete mirrors. Accordingly, in this thesis, different types of SLDMs have been designed for the compensation of the spherical distortions as well as for the typical super-Gaussian-shaped aspherical distortions which are characteristic for homogeneously pumped thin-disk laser crystals.

The shape of deformation of SLDMs is primarily depending on the distribution of the thickness of the mirror membrane. In this thesis, a formalism based on Kirchhoff-Love plate theory is elaborated which allows the calculation of the thickness distribution of a mirror membrane from a given desired deformation curve of the mirror surface at a defined pressure applied from the back side of the membrane. This formalism was used in order to specifically design and manufacture mirrors for the given compensation tasks: Mirrors which feature an almost ideal parabolic shape of deformation on the one hand, and mirrors featuring super-Gaussian deformations on the other.

Different types of SLDMs have been fabricated from high-quality HR-coated laser mirrors by an ultrasonic lapping process. Interferometric characterization of the surface deformation under load of different samples of these mirrors have shown excellent agreement of the measured surface shapes and the desired shapes of deformation used as target functions for the mirror design. For spherically deformable mirrors, diffraction-limited performance (i.e. peak-to-valley deviations of less than $\lambda/20$) could be demonstrated for refractive powers of up to ± 0.2 dpt at beam diameters of up to 7 mm. This is more than sufficient for the compensation of the spherical component of the thermally induced wavefront distortions in thin-disk lasers, which typically range to some mdpt/kW/cm². It could be shown that with slightly higher deviations from ideal parabolic deformations, refractive powers of up to ± 1 dpt and/or larger useable diameters should be possible as well. Similar results have been demonstrated for the aspherically deformable mirrors: The deviation of the measured surface shape from the given super-Gaussian functions of 8th order as well as the residual surface distortion at zero pressure were measured to be well below $\lambda/20$.

In order to evaluate the intra-cavity performance of these mirrors as well as to verify the approach pursued for the distortion compensation, a series of experiments was carried out. Firstly, the controllability of the operating point of a laser resonator by the intra-cavity use of a spherically deformable mirror was investigated. In order to reduce overall thermal effects and specifically the influence of the aspherical component of the wavefront distortions in the thin-disk laser crystal, a zero-phonon-pumped setup was used for these experiments. Nevertheless, a well-pronounced thermal lensing behavior, i.e. a distinct dependency of the beam quality of the output beam on pump power, could be observed. With the use of a spherically deformable mirror as cavity end-mirror, the beam quality of the output beam could be controlled reproducibly at different levels of output power of up to 1.1 kW by tuning the refractive power of the deformable mirror. This enabled al-

most diffraction-limited beam quality ($M^2 < 1.5$) of the output beam, which could be kept mostly constant throughout the full power range. At the maximum output power of 1077 W, a beam quality of $M_x^2 = 1.27$ and $M_y^2 = 1.19$ was measured in this experiment.

The investigations on the compensation of the aspherical component of the thermally induced wavefront distortions were carried out on a thin-disk laser resonator designed for fundamental-mode operation. The aspherically deformable mirror was used as an end-mirror in close proximity to the laser crystal in this cavity. A standard pumping scheme at a central wavelength of 940 nm was applied for pumping the Yb:YAG crystal. The surface shape of the deformable mirror used in these experiments was designed to match the corresponding component of the wavefront distortions in the thin-disk laser crystal. Without using the aspherically deformable mirror, increasing fluctuations of the output power could be observed at pump powers of above 800 W, leading to a decrease of overall efficiency and hence limiting output power to below 400 W. These fluctuations were attributed to wavefront distortions generated in the air in front of the laser crystal due to convective flow caused by the hot surface of the disk. By using the aspherically deformable mirror and optimizing the magnitude of deformation in order to achieve maximum output power, a significant reduction of these fluctuations could be observed. This enabled a more than two-fold increase of output power to about 815 W with a measured beam quality of the output beam of $M_x^2 = 1.38$ and $M_y^2 = 1.17$, respectively.

With the successful demonstration of a separate compensation of both spherical and aspherical wavefront distortions, a third series of experiments was carried out in order to demonstrate the combined intra-cavity compensation of both components simultaneously. For this purpose, a thin-disk laser pumped at 940 nm was implemented, with the cavity designed for low-order multimode operation ($M^2 < 3$). Similar to the experiments on aspherical compensation, a decrease of overall efficiency was observed at pump powers above 800 W when no compensating mirrors were used. By replacing the end-mirror of the cavity by an aspherically deformable mirror, which was placed in proximity to the thin-disk laser crystal, this decrease of efficiency could be effectively compensated for. As the pressures and hence the magnitudes of surface deformation applied to the deformable mirror were found to correspond well to the measured magnitude of the corresponding thermally induced wavefront distortions in the thin-disk laser crystal, it can be concluded that an actual distortion compensation was achieved in this experiment.

Subsequently, one of the folding mirrors of the cavity was replaced with a spherically deformable mirror, enabling the reproducible control of the beam quality of the output beam at different power levels of up to 1 kW. The simultaneous optimization of both output power (using the aspherically deformable mirror) and beam quality (using the spherically deformable mirror) has enabled an output power of up to 1036 W at an almost diffraction-limited performance ($M_R^2 < 1.29$). The dependency of beam quality on pump power could be effectively suppressed by control of the refractive power of the spherically deformable mirror, leading to a beam quality which was constant and almost diffraction-limited ($M_R^2 < 1.3$) throughout the full power range.

In summary, these experimental observations allow the conclusion that the deformable mirrors presented in this thesis enable an effective intra-cavity compensation of thermally induced wavefront distortions and hence offer significant advantages for the operation of high-power, high-brightness lasers. Both the stabilization and increased efficiency observed when using an intra-cavity aspherically deformable mirror as well as the possibility of controlling the operating point of the laser cavity by using a spherically deformable mirror offer the potential to overcome the typical limitations of solid-state lasers imposed by thermal lensing effects.

Based on the observations described in this thesis, it is to be expected that the combination of intra-cavity compensation schemes and zero-phonon-pumping will enable thin-disk laser systems generating output powers in the multi-kW-level with constant and diffraction-limited beam quality once sufficiently powerful stabilized pump diodes are available. Apart from continuous-wave applications, this is of utmost interest for the development of laser systems generating ultrashort pulses at high average powers. Stable single-transversal-mode operation is a prerequisite for stable generation of pulses in modelocked oscillators. The benefits of a controlled intra-cavity stabilization of the operating point of such an oscillator are therefore obvious.

Furthermore, extra-cavity applications such as the compensation of wavefront distortions in high-power laser amplifiers and beam delivery optics are of growing interest, as both continuous-wave and pulsed laser systems generating average powers in the kW-range are on the verge of entering the industrial environment. The deformable mirrors presented in this thesis offer a simple, cost-effective and above all powerful solution for these applications.

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

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 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