

Leistungskalierung ultrakurz gepulster radial polarisierter Laserstrahlung

von Dr.-Ing. Frieder Beirow
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. 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., 2021

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2022

ISBN 978-3-8316-4970-9

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Liste der verwendeten Symbole	5
Kurzfassung	7
Extended abstract	11
1 Einleitung	14
1.1 Motivation	14
1.2 Stand der Technik	17
1.2.1 Verstärkung radial polarisierter, ultrakurz gepulster Strahlen	17
1.2.2 Erzeugung radial polarisierter ultrakurz gepulster Strahlen .	22
1.2.2.1 Überblick über verschiedene Methoden zur Erzeugung radial polarisierter Strahlen	22
1.2.2.2 Erzeugung ultrakurzer Pulse mit Scheibenlaseroszillatoren	27
1.3 Forschungsbedarf und Zielsetzung	28
1.3.1 Zielsetzung zur Erzeugung ultrakurz gepulster, radial polarisierter Strahlen mit einem Scheibenlaseroszillator	30
1.3.1.1 Untersuchungen zur Polarisationsformung	31
1.3.1.2 Geregelte Kompensation der thermischen Linsenwirkung des Scheibenlaserkristalls	35
1.3.2 Zielsetzung zur Verstärkung ultrakurz gepulster, radial polarisierter Strahlen mit einem SCF-Verstärker	38
2 Untersuchungen zur Steigerung der optischen Effizienz modengekoppelter Scheibenlaser zur Erzeugung radial polarisierter Strahlen	39
2.1 Publikation	39
2.2 Einordnung der Ergebnisse	64

3	Leistungskalierung eines modengekoppelten Scheibenlaseroszillators zur Erzeugung radial polarisierter Strahlen	65
3.1	Publikation	65
3.2	Einordnung des experimentellen Resultats	80
4	Untersuchungen zur Kompensation der thermischen Linsenwirkung in Scheibenlaserresonatoren	81
4.1	Publikation	82
4.2	Einordnung der Ergebnisse	93
5	Untersuchungen zur Verstärkung ultrakurz gepulster radial polarisierter Strahlen	94
5.1	Publikation	94
5.2	Einordnung der Ergebnisse	120
6	Zusammenfassung und Ausblick	122
	Literaturverzeichnis	125
	Danksagung	135

Kurzfassung

In der Lasermaterialbearbeitung spielt die gezielte Anpassung der Polarisation eine wichtige Rolle zur Steigerung der Effizienz und Qualität verschiedener Bearbeitungsprozesse. Radial und azimuthal polarisierte Laserstrahlen erwiesen sich als vorteilhaft beim Laserschneiden, Laserbohren und bei der Oberflächenstrukturierung. Um die Attraktivität radial und azimuthal polarisierter Strahlen für den Einsatz in der industriellen Fertigung zu steigern, werden Strahlquellen benötigt, die hohe mittlere Leistungen zur Verfügung stellen und gleichzeitig kompakt, kostengünstig und wartungsarm sind. Diese Arbeit befasst sich mit der Erzeugung und Verstärkung ultrakurz gepulster (Pulsdauer < 10 ps), radial polarisierter Strahlen. Im Vordergrund stand eine Steigerung der mittleren Leistung bei gleichzeitiger Reduzierung von Kosten, Dimensionen und Komplexität des Lasersystems.

Vor Beginn dieser Arbeit wurde die Verstärkung radial polarisierter, ultrakurz gepulster Strahlen auf mittlere Leistungen von über 100 W ausschließlich mit Scheibenlaser-Multipassverstärkern demonstriert. Den herausragenden Eigenschaften dieser Laserarchitektur für die Verstärkung auf hohe mittlere Leistungen bis in den Kilowatt Bereich bei Pulsenergien im Millijoule Bereich stehen signifikante Nachteile wie hohe Anschaffungskosten, eine große räumliche Ausdehnung und eine hohe Systemkomplexität entgegen. Eine vielversprechende kompakte und kostengünstige Alternative zu Scheibenlaser-Multipassverstärkern für die Verstärkung radial polarisierter, ultrakurz gepulster Strahlen auf einige hundert Watt bietet das „Single-Crystal-Fiber“ (SCF) Verstärkerkonzept. Ziel dieser Arbeit war eine Skalierung der mittleren Leistung ultrakurz gepulster, radial polarisierter Strahlen auf über 200 W mit einem kompakten einstufigen SCF-Verstärker sowie eine Untersuchung der Limitierungen dieses Konzepts. Um mit einem einstufigen SCF-Verstärker eine hohe Extraktionseffizienz und eine hohe mittlere Ausgangsleistung zu erzielen, wird eine leistungsstarke Seedquelle benötigt, welche die Verstärkung des Laserkristalls ausreichend sättigt. Daher waren auch Untersuchungen zur Leistungskalierung ultrakurz gepulster, radial polarisierter Strahlen mit modengekoppelten Scheibenlaseroszillatoren Bestandteil dieser Arbeit.

Die höchste mittlere Leistung ultrakurz gepulster, radial polarisierter Strahlen ohne Nachverstärkung betrug vor Beginn dieser Arbeit 13,3 W und wurde mit einem

modengekoppelten Scheibenlaseroszillator demonstriert [1]. Zur Stabilisierung des modengekoppelten Betriebs wurde ein sättigbarer Halbleiterspiegel (engl.: Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) als Endspiegel des Resonators verwendet und zur Polarisationsformung kam eine teilreflektive Gitter-Wellenleiterstruktur (engl.: Grating Waveguide Structure, GWS) zum Einsatz, welche als Auskoppel-element des Resonators fungierte. Diese teilreflektive GWS wird im Folgenden als GWOC (engl.: Grating Waveguide Output Coupler, GWOC) bezeichnet. Der GWOC beugte in der in [1] beschriebenen Ausführung bis zu 45% der aus dem Resonator ausgekoppelten Leistung in eine höhere Beugungsordnung [2], was die erreichbare optische Effizienz stark einschränkte. Aus diesem Grund wurden in der Folge weitere Untersuchungen zur Steigerung der optischen Effizienz modengekoppelter Scheibenlaseroszillatoren zur Erzeugung radial polarisierter Strahlen durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war, den GWOC durch eine hochreflektive GWS, welche im Folgenden als GWM (engl.: Grating Waveguide Mirror, GWM) bezeichnet wird, zu ersetzen, um besagte Beugungsverluste zu umgehen. Hierzu wurden zwei verschiedene Resonator-Konfigurationen untersucht, welche den Einsatz eines GWMs zur Polarisationsformung ermöglichten.

In einer dieser Konfigurationen wurde ein GWM als Endspiegel des Resonators eingesetzt und zur Stabilisierung des modengekoppelten Betriebs kam ein teilreflektiver sättigbarer Halbleiterspiegel (engl.: Semiconductor Saturable Output Coupler, SESOC) zum Einsatz, welcher als Auskoppel-element fungierte. Da ein SESOC im Gegensatz zu einem SESAM nicht rückflächig gekühlt werden kann, ist die erreichbare Strahlqualität aufgrund von thermischen Effekten limitiert. Mit einem numerischen Modell wurde die erreichbare Leistung bei guter Strahlqualität ($M^2 < 2,5$) auf 6-10 W abgeschätzt, was experimentell bestätigt wurde. Mit dem numerischen Modell konnte eine Strategie zur Reduzierung der thermisch induzierten Aberrationen identifiziert und bewertet werden. Durch das frontseitige Aufbringen eines einkristallinen Diamant-Wärmespreizers und einer Reduzierung der Substrat-Dicke sollte laut dem numerischen Modell mit einem optimierten SESOC eine mittlere Ausgangsleistung von bis zu 150 W bei guter Strahlqualität erreichbar sein.

In einer weiteren Resonator-Konfiguration wurde ein GWM zur Polarisationsformung als Faltelement eingesetzt, wodurch ein SESAM als Endspiegel des Resonators verwendet werden konnte. Mit einem GWM mit einer Reflektivität von 99,3% konnte im Dauerstrichbetrieb eine um 9 Prozentpunkte höhere Effizienz als mit einem GWOC als Auskoppel-element erzielt werden. Numerische Simulationen zeigten, dass mit einem GWM mit einer Reflektivität von 99,8% eine um etwa 20 Prozentpunkte höhere optische Effizienz als mit den derzeit verfügbaren verlustbehafteten

GWOCs [1] erreichbar sein sollte. Ferner wurde in dieser Konfiguration ein stabiler modengekoppelter Betrieb mit einer Ausgangsleistung von 15 W mit nahezu idealer Strahlqualität von $M^2 = 2,1$ demonstriert.

Die zum Zeitpunkt der Durchführung der experimentellen Arbeiten verfügbaren GWMs zur Erzeugung radial polarisierter Laserstrahlen wurden für einen senkrechten Einfall des Strahls ausgelegt [3]. Um für einen als Faltelement verwendeten GWM eine hohe Reflektivität zu gewährleisten, sollte dieser unter einem kleinen Einfallswinkel ($<0,5^\circ$) betrieben werden. Diese Anforderung bedingt, verglichen mit einem Resonator, in welchem zur Polarisationsformung ein GWOC als Auskoppellement eingesetzt wird, einen deutlich längeren Resonator. Da bei modengekoppelten Laseroszillatoren die Pulsrepetitionsrate durch die Umlaufdauer im Resonator bestimmt ist, nimmt mit der Resonatorlänge die Pulsrepetitionsrate ab. Folglich wird bei dem längeren Resonator bei gleicher mittlerer Leistung eine höhere Pulsenergie und Pulsspitzenleistung erreicht, sodass limitierende nichtlineare Effekte wie Selbstphasenmodulation bei geringerer mittlerer Leistung zum Tragen kommen. Da innerhalb dieser Arbeit eine Skalierung der mittleren Leistung im Vordergrund stand, wurde in dem entsprechenden Experiment ein GWOC als Auskoppellement verwendet um einen möglichst kompakten Resonator mit einer hohen Pulsrepetitionsrate zu realisieren. Somit konnte mit einem modengekoppelten Scheibenlaseroszillator radial polarisierte, ultrakurz gepulste Strahlung mit einer mittleren Leistung von 125 W bei einer Pulsenergie von $1,6 \mu\text{J}$ und einer Pulsspitzenleistung von 1,45 MW erzeugt werden. Dieser Leistungsbereich war vor Beginn dieser Arbeit ausschließlich mit Scheibenlaser-Multipassverstärkern erreichbar.

Eine weitere Erhöhung der Ausgangsleistung des modengekoppelten Scheibenlaseroszillators über 125 W war durch die thermische Linsenwirkung des Scheibenlaserkristalls limitiert. Als Lösungsansatz für diese Problematik wurde im Rahmen dieser Arbeit die Kompensation der thermischen Linsenwirkung des Scheibenlaserkristalls mit einem sphärisch deformierbaren Spiegel (engl.: Spherically Deformable Mirror, SDM) als Aktor in einem geschlossenen Regelkreis untersucht. Die grundlegende Untersuchung des Konzepts wurde an einem Grundmode-Scheibenlaserresonator im Dauerstrichbetrieb durchgeführt. Als Regelgröße wurde der Strahlradius auf der Laserscheibe gemessen. Experimentell konnte mit diesem Ansatz die thermische Linsenwirkung bis zu einer Pumpleistung von 1 kW kompensiert werden, was einen effizienten Laserbetrieb mit beugungsbegrenzter Strahlqualität bis zu einer Ausgangsleistung von 500 W ermöglichte. Nach dieser erfolgreichen Demonstration kann das Konzept in einem zukünftigen Experiment auf einen modengekoppelten Scheibenlaseroszillator zur Erzeugung radial polarisierter Strahlen übertragen werden.

Die übergeordnete Zielsetzung der Untersuchungen zur Leistungsskalierung ultrakurz gepulster, radial polarisierter Strahlen mit Scheibenlaseroszillatoren war die Entwicklung einer leistungsstarken Seedquelle für eine effiziente Verstärkung in einem kompakten, einstufigen SCF-Verstärker. Mit einem auf Langzeitstabilität optimierten, modengekoppelten Scheibenlaseroszillator als Seedquelle, wurde radial polarisierte Strahlung mit einem einstufigen SCF-Verstärker auf eine mittlere Leistung von 290 W und eine Pulsenergie von 6 μJ verstärkt. Im Vergleich zum Stand der Technik vor Beginn dieser Arbeit konnte die erreichbare Leistung radial polarisierter, ultrakurz gepulster Strahlen mit einem SCF-Verstärker um mehr als einen Faktor drei gesteigert werden. Die Strahlqualität bei der maximalen Ausgangsleistung betrug $M^2 = 2,9$. Mit einem numerischen Modell wurde die maximal erzielbare Leistung mit guter Strahlqualität ($M^2 < 2,5$) auf etwa 240 W abgeschätzt. Ferner wurde das numerische Modell herangezogen, um die Limitierungen der SCF-Technologie bei einer Steigerung der Pump- und der Seedleistung abzuschätzen. Bei einer Pumpleistung von 2 kW und einer Seedleistung von 500 W sollte demnach eine mittlere Ausgangsleistung von über 1 kW bei einer Strahlqualität von $M^2 < 3,5$ erreichbar sein. Nichtlineare Effekte limitieren die erzielbare Pulsspitzenleistung auf etwa 8 MW.

Extended abstract

In laser material processing, the customization of the polarization plays an important role to increase the efficiency as well as the quality of various machining processes. Radially and azimuthally polarized beams have shown advantages for laser cutting, laser drilling and surface structuring. To increase the attractiveness of radially and azimuthally polarized beams for the use in industrial manufacturing, laser sources that provide high average output powers while being compact, providing low cost and low maintenance are required. This work addresses the generation and amplification of radially polarized ultra-short pulsed laser beams. The focus was on increasing the average power while reducing the costs, dimensions, and complexity of the laser system.

At the beginning of this work, radially polarized ultra-short pulsed laser beams with output powers exceeding 100 W could only be provided by thin-disk multipass amplifiers. The outstanding properties of thin-disk multipass amplifiers for the amplification to high average powers in the kilowatt range and high pulse energies in the millijoule range are contrasted by significant disadvantages like high costs of acquisition, large spatial dimensions and a high level of complexity. The „Single-Crystal-Fiber“ (SCF) concept represents a promising, cost-efficient and compact alternative to the thin-disk multipass concept for the amplification of radially polarized ultra-short pulsed beams to average powers of a few hundred Watts. The aim of this work was to scale the average power of radially polarized ultra-short pulsed beams to average powers exceeding 200 W using a compact single-stage SCF amplifier as well as a theoretical investigation of the limitations of this concept. In order to reach high average powers and high extraction efficiencies with a single-stage SCF amplifier, a powerful seed source which saturates the gain sufficiently is needed. Investigations on scaling the average power of mode-locked thin-disk oscillators emitting radially polarized beams was therefore also part of this work.

Before the beginning of this work, the maximum average power of ultra-short pulsed radially polarized beams generated with laser oscillators was 13.3 W [1]. This result was achieved with a mode-locked thin-disk oscillator employing a Semiconductor Saturable Absorber Mirror (SESAM) as the resonator's end mirror to stabilize mode-locked operation. For polarization shaping, a partly-reflective Grating Waveguide

Structure (GWS) was implemented as output coupling element. In the following, this partly-reflective GWS is referred to as Grating Waveguide Output Coupler (GWOC). The GWOC diffracted up to 45% of the power coupled out of the resonator into a higher diffraction order [2], which significantly limited the achievable optical efficiency. Investigations to increase the optical efficiency of mode-locked thin-disk oscillators emitting radially polarized pulses were therefore conducted within further work. To avoid the aforementioned diffraction losses, the aim of these investigations was to replace the GWOC with a highly-reflective GWS, which is referred to as Grating Waveguide Mirror (GWM) in the following. To this end, two different resonator configurations which allowed to use a GWM instead of a GWOC for polarization shaping, were investigated. In one configuration, the GWM was used as the end mirror of the resonator and a Semiconductor Saturable Output Coupler (SESOC) was used as the output coupler to stabilize the mode-locked operation. In contrast to a SESAM, a SESOC cannot be cooled from the backside and therefore the transmitted beam suffers from aberrations reducing the beam quality. Using a numerical model, the maximum output power with good beam quality ($M^2 < 2.5$) was estimated to be limited to 6-10 W, which was confirmed experimentally. A strategy to reduce the thermally induced aberrations in the SESOC was therefore identified and evaluated with this model. By applying a single-crystal diamond heat spreader at the front side of the SESOC and by reducing the substrate thickness, an average output power of up to 150 W can be expected with a SESOC while maintaining good beam quality.

In another resonator configuration, a GWM with a reflectivity of 99.3% was used as a folding element for polarization shaping, allowing a SESAM to be used as the end mirror of the resonator. In continuous-wave operation, the optical efficiency in this configuration was 9 percentage points higher compared to the configuration incorporating a GWOC. Numerical simulations indicate that using a GWM with a reflectivity of 99.8% will enable an optical efficiency which is about 20 percentage points higher compared to the configuration using a GWOC. Experimentally, stable mode-locked operation with an output power of 15 W with close to ideal beam quality of $M^2 = 2.1$ was demonstrated in this configuration.

The GWMs available at the time the experimental work was carried out were designed to be used under normal incidence [3]. To ensure a high reflectivity of the GWM used as folding element, the angle of incidence has to be small ($< 0.5^\circ$). Consequently, a resonator with a GWM implemented as folding element is longer than a resonator using a GWOC as output coupling element, resulting in a lower pulse repetition rate. This resonator will therefore yield a higher pulse energy and a higher pulse peak power at a given average power. Therefore, in the case of the

longer resonator, limiting non-linear effects like self-phasemodulation will come into play at lower average powers. Since the aim of this work was scaling the average power, the corresponding experiment was conducted using a GWOC as output coupling element for polarization shaping to realize a thin-disk oscillator with a high pulse repetition rate. In this configuration, an average power of 125 W at a pulse energy of 1.6 μJ and a pulse peak power of 1.45 MW was obtained. Before this work, this range of average power was exclusively accessible with thin-disk multipass amplifiers.

A further increase of the output power above 125 W of the mode-locked thin-disk oscillator was limited by the thermal lensing effect of the thin-disk crystal. As an approach to solve this issue, the closed-loop controlled compensation of the thermal lensing effect by means of a Spherically Deformable Mirror (SDM) was investigated within further work. The fundamental investigation of this approach was conducted with a thin-disk resonator operated in fundamental-mode continuous-wave operation. The radius of the beam oscillating in the resonator at the position of the laser crystal was measured and an SDM was used as an actuator to control the beam radius at the laser crystal. The thermal lensing effect was compensated for up to a pump power of 1 kW which enabled the efficient generation of a diffraction limited beam up to an output power of 500 W. After the successful demonstration of the closed-loop controlled compensation of the thermal lensing effect, this concept can be applied to a mode-locked thin-disk oscillator delivering radially polarized ultra-short pulsed beams in a future experiment.

The overall objective of the experimental investigations on scaling the average power of radially polarized laser beams with mode-locked thin-disk oscillators was the development of a powerful seed source which can be efficiently amplified in a compact single-stage SCF amplifier. A SESAM mode-locked thin-disk oscillator optimized for long term stability delivering a radially polarized beam with an average power of 53 W was used as seed source. This beam was amplified to a maximum average output power of 290 W and a pulse energy of 6 μJ . The beam quality at this power was measured to be $M^2 = 2.9$. In order to estimate the obtainable output power and beam quality, a numerical model was developed. With this model, the achievable output power with good beam quality ($M^2 < 2.5$) was predicted to be 240 W. Furthermore, the numerical model was used to estimate the limitations of the SCF technology with regards to average power. With a pump power of 2 kW and a seed power of 500 W, the model suggests that an average output power of more than 1 kW with a beam quality of $M^2 < 3.5$ should be achievable. However, non-linear effects limit the obtainable pulse peak power to about 8 MW.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorritz, Michael

Adaptives Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißtauglichkeit von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-8

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Platz, Wilfried

Zerstörungsschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspansung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-3

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötlens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-
temkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-
umguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

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 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

Tilman Froschmeier-Hanss

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

Moritz Vogel

Specialty 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 978-3-8316-4643-2

Karin Heller

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

Stefan Piehler

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

Felix Abt

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

Volker Rominger

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

Thomas Rataj

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

Michael Diez

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

Andreas Heider

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

Marcel Schäfer

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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

Tom Dietrich

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

Martin Rumpel

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

Michael Eckerle

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

Martin Stubenvoll

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

Christian Hagenlocher

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

Florian Fetzer

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

Michael Jarwitz

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

Christian Röhler

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

Martin Sommer

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

Birgit Weichelt

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

Sebastian Faas

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

Daniel Weller

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

Sebastian Hecker

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

Frieder Beirow

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