

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

M. Rumpel
Applications of Grating Waveguide
Structures in Solid-State Lasers

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

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

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

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

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

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers

von Dr.-Ing. Martin Rumpel
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. Thomas Dekorsy

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

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

Copyright © utzverlag GmbH 2019

ISBN 978-3-8316-4801-6

Printed in Germany

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

Content

List of figures.....	7
List of tables.....	11
Symbols and abbreviations.....	13
Extended abstract.....	15
Kurzfassung in deutscher Sprache.....	17
1 Introduction.....	21
1.1 Motivation.....	21
1.2 State of the art.....	22
1.2.1 Wavelength and polarization stabilization in TDL.....	22
1.2.2 Fully-dielectric diffraction gratings.....	23
2 Objective of the thesis.....	25
2.1 Structure of this work.....	25
2.2 Unique properties of GWS for applications in laser physics.....	25
3 Introduction to GWS.....	33
3.1 Historical origin.....	33
3.1.1 Resonant-Reflection GWS.....	33
3.1.2 Resonant-Diffraction GWS.....	34
3.1.3 Leaky-Mode GWS.....	35
3.2 Physical mechanisms in GWS.....	36
3.2.1 Guided and leaky modes in planar waveguides.....	36
3.2.2 Diffraction gratings.....	38
3.2.3 Diffraction grating assisted coupling of planar waveguide modes.....	40
3.2.4 Resonant Reflection.....	41
3.2.5 Resonant Diffraction.....	44
3.2.6 Leaky-mode excitation.....	47
3.3 Design of GWS for applications in lasers.....	49
3.3.1 Resonant-Reflection GWS.....	50
3.3.1.1 Single-layer waveguide.....	50
3.3.1.2 Single-layer waveguide with partial reflector.....	50
3.3.1.3 Special considerations for application as OC.....	53

3.3.2	Resonant-Diffraction GWS	53
3.3.2.1	Design for Littrow-configuration	53
3.3.2.2	Obtaining a high LIDT	56
3.3.3	Leaky-Mode GWS	57
3.3.3.1	Application as end-mirror.....	57
3.3.3.2	Application as OC.....	57
4	Experimental results.....	61
4.1	Intra-cavity stabilization of linear polarization and emission wavelength.....	61
4.1.1	RR-GWS as cavity end-mirror.....	61
4.1.2	RR-GWS as folding-mirror.....	64
4.1.2.1	In an Er:YAG rod-laser	64
4.1.2.2	In an Yb:YAG TDL.....	64
4.1.3	RD-GWS as cavity end-mirror.....	66
4.1.4	RD-GWS as OC	67
4.2	Generation of radiation with azimuthal polarization.....	70
4.2.1	RR-GWS as cavity end-mirror	71
4.2.2	LM-GWS as cavity end-mirror	73
4.3	Wavelength tuning	75
4.3.1	By using RR-GWS.....	75
4.3.2	By using RD-GWS.....	77
4.4	Intra-cavity SHG	77
4.4.1	Spectroscopic characterization of RD-GWS.....	78
4.4.2	Intra-cavity SHG experiment	79
4.5	Stretching and compression of laser pulses	80
4.5.1	Intra-cavity laser pulse stretching	81
4.5.2	Extra-cavity laser pulse compression.....	81
4.6	Manufacturing tolerances.....	81
4.6.1	Investigations on the grating profile in the coating layers	82
4.6.2	Subsequent etching to shape the spectral profile of the DE.....	84
5	Summary and outlook	87
	Bibliography.....	91
	Danksagung.....	101

Extended abstract

Laser sources emitting in the green spectral range (e.g. at 515 nm wavelength) see an ever greater demand in the industrial production of power electronics, electrical motors and circuits. This is driven by the rapid growth in fields such as renewable energies, e-mobility and battery technologies, where materials such as copper or gold are utilized in large quantities. Material processing by lasers, emitting radiation in the green spectral range was shown to be particularly advantageous here [Eng11]. Since conventional laser sources for industrial production typically emit at a wavelength of 1 μm , the state-of-the-art method to generate laser beams in the green spectral range with a high average power is using the generation of the second-harmonic in the cavity by means of a nonlinear crystal [Weil12, Got13]. In order to obtain high conversion efficiency to the second harmonic in the cavity, polarization and wavelength of the radiation in the laser cavity have to be stabilized [Die15, Die18]. Conventional devices for that matter are etalons or birefringent filters and thin-film polarizers. Due to thermal effects, these elements are the limiting factor in the scaling of the output power from such a laser cavity [Ahm15]. Finding a single device for the stabilization of polarization and wavelength of the radiation in the cavity that is highly efficient and as well suitable for high intra-cavity powers was therefore one objective of this thesis.

Another topic that currently experiences a lot of attention is the development of laser sources with pulse durations in the sub-ps range due to their advantages in material processing, e.g. surface modifications or cutting of *Carbon-Fiber-Reinforced Plastics* (CFRP) [Web11-2]. To generate beams with high average powers ($> 1 \text{ kW}$) the so called *chirped-pulse amplification* [Str85] is one of the most widespread approaches today. The pulse stretcher and pulse compressor [Tre69] used in a *chirped-pulse amplification* system are typically made from gold-coated gratings, which have a comparatively low laser-induced damage threshold of 0.4 J/cm^2 in the fs range of the pulse duration at a wavelength of around 1 μm . The diffraction efficiency reaches 96% in the best case [Bri95]. Fully dielectric gratings were shown to have diffraction efficiencies exceeding 99% and *Laser-Induced Damage Thresholds* (LIDT) exceeding several J/cm^2 [Bon16]. Another objective of this thesis was thus to investigate fully dielectric diffraction gratings to stretch and compress laser pulses.

It was shown in the research presented in this thesis that the so-called *Grating Waveguide Structure* (GWS) [Gol85, Sal98, Mos04] can fulfill both objectives. It was experimentally verified that the emission spectrum of an Yb:YAG thin-disk laser can be stabilized to a linewidth of only 20 pm with a degree of linear polarization of the emitted beams of $> 99\%$ [Rum13]. The GWS were furthermore tested intra-cavity at a

power density of 125 kW/cm² [Rum12] where all its functions in terms of stabilizing polarization and wavelength of the emitted beams worked properly. GWS were also successfully implemented to an Er:YAG rod laser in an external test [Aub14], that demonstrated how a thin-film polarizer, aperture and etalon could be replaced by a single folding-mirror (the GWS) in the cavity. Based on these results, special GWS were developed and used in an experiment at the IFSW [Die15, Pie16] to generate 403 W of almost diffraction limited ($M^2 = 1.3$) radiation with a wavelength of $\lambda = 515$ nm. This was achieved by applying the intra-cavity second-harmonic generation to an Yb:LuAG thin-disk laser, where the GWS acted as cavity end-mirror that was stabilizing polarization and wavelength of the oscillating radiation field. A record of 40.7% was achieved for the optical efficiency of the emitted beam ($\lambda = 515$ nm) with respect to the pumping radiation ($\lambda = 969$ nm). The GWS could handle a power density of 133 kW/cm² without problems in this demonstration. Later, the same laser system produced even beams with a power of 1 kW ($M^2 \approx 20$) and with an optical efficiency of 51.6% [Die18].

Within the work leading to this thesis, GWS were also developed, that could be fabricated repeatedly with a measured diffraction efficiency in the -1st diffraction order of $99.7 \pm 0.2\%$ [Rum14]. Using two GWS of the same architecture with diffraction efficiencies of $99.3 \pm 0.2\%$ at a wavelength of 1030 nm, an overall compressor efficiency of 96.3% [Rum14] could be demonstrated in an external test. To the best of my knowledge this was the highest compressor efficiency ever published at that time. In another external test [Car15], a novel design of a regenerative amplifier with a pulse stretcher in the cavity could be realized. It utilized a GWS in the cavity that was developed during the work, leading to this thesis.

Laser beams with an azimuthal state of polarization can be beneficial in the field of laser material processing [Kra10, Web11]. Therefore, GWS were investigated to be used as an intra-cavity end-mirror that was azimuthally polarizing the oscillating radiation field [Rum12-2]. Beams with a power of 103 W and a clear state of azimuthal polarization could be generated successfully by this approach from an Yb:YAG thin-disk laser.

The research carried out that led to this thesis enabled the development of GWS to handle unprecedented power densities and to reach new records in efficiency in various applications the GWS were used in. It paved the way for novel applications of GWS in thin-disk lasers [Die17] and a spin-off of the IFSW (www.martec-photonics.com) which is dedicated to the commercialization of the application of GWS in the field of laser physics.

Kurzfassung in deutscher Sprache

Die Sektoren der erneuerbaren Energien, Batterietechnologie und Elektromobilität verlangen nach effizienten und stabilen Bearbeitungsprozessen für Materialien wie z.B. Kupfer und Gold. Klassische Hochleistungslaserquellen, die zur industriellen Materialbearbeitung mit dem Laser eingesetzt werden, emittieren hauptsächlich im Infrarotbereich bei einer Wellenlänge von etwa 1 μm . Strahlung dieser Wellenlänge wird zum größten Teil von Kupfer und Gold reflektiert und nur zu $< 5\%$ absorbiert. Zusätzlich haben diese Materialien eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Damit kann für diese Materialien in der Regel nicht die gleiche Prozessstabilität und Effizienz z.B. beim Bohren und Schweißen mit dem Laser erreicht werden, wie es für Stahl möglich ist. Grünes Licht dagegen weist für Kupfer und Gold eine deutlich höhere Absorption von $> 35\%$ auf, was bessere Bearbeitungsprozesse mit dem Laser ermöglicht [Eng11]. Dies motiviert die Erforschung von Laserquellen, die grüne Laserstrahlung emittieren. Die gängigste Methode zur Erzeugung grüner Laserstrahlung ist die resonatorinterne Frequenzverdopplung durch nichtlineare Kristalle [Weil12, Gott13]. Um hohe Anteile in der oszillierenden Strahlung im Resonator in der zweiten Harmonischen zu erhalten, sind hohe Leistungsdichten im nichtlinearen Kristall notwendig. Ebenso ist die Stabilisierung der Polarisation der im Resonator oszillierenden Infrarotstrahlung sowie deren möglichst schmalbandiges Spektrum für eine hohe Konversionseffizienz erforderlich [Pie16, Die18]. Um Polarisation und Wellenlänge der oszillierenden Laserstrahlung im Resonator zu stabilisieren, werden konventionell Etalons, Doppelbrechungsfilter und Dünnschichtpolarisatoren verwendet. Diese Elemente haben sich aber bei der Steigerung der Ausgangsleistung als limitierend erwiesen [Ahm15]. Dies ist dadurch begründet, dass für hohe Leistungsdichten thermische Linsen in den transmittierenden Elementen entstehen. Zudem sind gewöhnlich mehrere dieser Komponenten im Resonator notwendig, die zueinander feinjustiert werden müssen. Dies erhöht die Komplexität des Resonators. Ein Ziel meiner Arbeit war es daher, ein einzelnes und hocheffizientes Element zu finden, das Polarisations- und Wellenlängenstabilisierung direkt im Resonator vereint und auch für höchste resonatorinterne Leitungen geeignet ist.

Ein weiteres brandaktuelles Thema sind Ultrakurzpuls laser, welche in der Lasermaterialbearbeitung eine immer breitere Anwendung finden. Sie sind besonders dadurch motiviert, dass durch die hohen Pulsspitzenleistungen Bearbeitungsprozesse ermöglicht werden, bei denen kaum thermische Schädigung des Werkstücks entsteht. Dies ist besonders vorteilhaft für Bearbeitungsprozesse mit dem Laser im Bereich des Leichtbaus der Automobil- und Flugzeugindustrie, wo Verbundwerkstoffe bearbeitet werden wie z.B. kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) [Web11-2]. Die „chir-

ped-pulse amplification“ [Str85] hat sich als eine der gängigsten Methoden erwiesen, um gepulste Laser höchster Pulsenergien und mittlerer Leistung zu realisieren. Dafür werden Laserpulse gestreckt, um ihre Spitzenleistung zu reduzieren. Dann durchlaufen sie einen oder mehrere Verstärker und werden anschließend idealerweise auf ihre ursprüngliche Pulsdauer komprimiert. Für das Strecken und Komprimieren sind Beugungsgitter [Tre69] die weit verbreitetsten Komponenten. Üblicherweise werden goldbeschichtete Gitter eingesetzt. Diese sind bei Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von $1\ \mu\text{m}$ auf eine Beugungseffizienz von 96% sowie eine laserinduzierte Zerstörschwelle von $0.4\ \text{J}/\text{cm}^2$ bei Pulsdauern im fs-Bereich limitiert [Bri95]. Volldielektrische Beugungsgitter können hier Zerstörschwellen von mehreren J/cm^2 und Beugungseffizienzen von $> 99\%$ erreichen [Bon16]. Ein weiteres Ziel meiner Arbeit war es daher, ein Beugungsgitter zu untersuchen, das eine höhere Beugungseffizienz und laserinduzierte Zerstörschwelle aufweist, als goldbeschichtete Gitter.

Als Lösungsansatz für diese Problemstellungen wurde in meiner Dissertation das Konzept der *Gitter-Wellenleiter-Strukturen* (GWS) untersucht. Dazu wurden drei verschiedene Architekturen von GWS betrachtet: die GWS basierend auf der resonanten Reflektion (RR-GWS) [Gol85], die GWS basierend auf der resonanten Beugung (RD-GWS) [Sal98] und die GWS der Anregung von verlustbehafteten Moden (engl. „leaky modes“, LM-GWS) [Mos04]. Versuche im Scheibenlaser zeigten, dass durch die RR-GWS ein Yb:YAG Scheibenlaser auf eine Emissionsbandbreite von nur $20\ \text{pm}$ stabilisiert werden konnte. Die Ausgangsleistung betrug $70\ \text{W}$ bei einer optischen Effizienz von 24.3% und einer Strahlqualität von $M^2 = 1.1$. Der Grad der linearen Polarisation betrug $> 99\%$ [Vog12]. Mit einer solchen RR-GWS gelang es in einem externen Experiment einen Er:YAG Stablaser polarisations- und wellenlängenmäßig zu stabilisieren. Die GWS erlaubte es dabei einen Dünnschichtpolarisator, ein Etalon und eine Apertur durch einen einzigen Faltungsspiegel (die GWS) zu ersetzen [Aub14]. Mit einem zweiten RR-GWS Design, ausgelegt für die höhere resonatorinterne Leistungen, gelang es, Strahlung mit einer Leistung von $70\ \text{W}$ und einer optischen Effizienz von 37.1% zu erzeugen – die anderen Strahlparameter blieben praktisch unverändert [Rum13]. Diese GWS war ein potentieller Kandidat für die Versuche zur Steigerung der Effizienz der resonatorinternen Frequenzverdopplung. Mit der RD-GWS konnten jedoch ähnliche Effizienzen bei wesentlich geringerer Wärmeentwicklung erreicht werden und damit eine potentiell deutlich höherer Zerstörschwelle. Die Wärmeentwicklung wurde anhand der Oberflächentemperatur auf der GWS im Laserbetrieb gemessen. Der Grad der linearen Polarisation und die Emissionsbandbreite der emittierten Strahlung hatten quasi die gleichen Werte wie schon oben für die RR-GWS erwähnt. Es wurden Leistungsdichten von bis zu $125\ \text{kW}/\text{cm}^2$ auf der GWS erreicht, ohne dass die Funktionalität der GWS zur Stabilisierung von Polarisation und Wellen-

länge der emittierten Strahlung beeinträchtigt wurde [Rum12]. Daher wurde die RD-GWS für die Versuche zur Frequenzverdopplung verwendet. Es wurden RD-GWS im Rahmen meiner Dissertation entwickelt, mit welchen am IFSW resonatorintern frequenzverdoppelt Laserstrahlen mit einer Leistung von 403 W aus einem Yb:LuAG Scheibenlaser ausgekoppelt werden konnten [Die15, Pie16]. Dies gelang mit einem Rekord mit einer optischen Effizienz von 40.7%, bezüglich frequenzverdoppelter Ausgangsleistung (515 nm Wellenlänge) zu infraroter Pumpleistung (969 nm Wellenlänge). Die Leistungsdichte auf der GWS betrug dabei 133 kW/cm². Die Strahlqualität betrug $M^2 = 1.3$. In einem späteren Versuch gelang es mit denselben Komponenten und diesem Scheibenlaser, sogar 1 kW ($M^2 \approx 20$) bei einer optischen Effizienz von 51.6% zu erzeugen [Die18].

Die RR- und LM-GWS Architekturen wurden im Rahmen der Dissertation auch auf ihre Möglichkeiten zur Erzeugung von Laserstrahlen mit azimuthaler Polarisation im Scheibenlaser untersucht. Dies war dadurch motiviert, dass mit diesem Polarisationszustand Vorteile bei der Lasermaterialbearbeitung gezeigt werden konnten [Kra10, Web11]. Es gelang mit der RR-GWS azimuthal polarisierte Laserstrahlen mit einer Ausgangsleistung von 93 W mit einem Yb:YAG Scheibenlaser zu erzeugen. Die GWS wurden dabei als Endspiegel im Resonator eingesetzt. Mit der LM-GWS konnten in gleicher Konfiguration Laserstrahlen mit 103 W erzeugt werden. Die Strahlqualität wurde beide Male zu $M^2 = 2.2$ gemessen [Rum12-2].

Ebenso wurde das Potential untersucht, wie gut sich die Emissionswellenlänge durch den resonatorinternen Einsatz von RR- und RD-GWS durchstimmen lässt. Beide Konzepte konnten erfolgreich dafür eingesetzt werden und verschiedenste neue laseraktive Materialien für den Scheibenlaser auf ihre spektrale Emission hin untersucht werden [Dan14, Wen16].

Mit einer RD-GWS die im Rahmen dieser Dissertation entwickelt wurde, konnte in einem externen Test ein neuartiger Resonator realisiert werden, der einen regenerativen Verstärker darstellt, bei welchem ein Pulsstreckter integriert ist, welcher nur aus einem Gitterspiegel besteht [Car15]. Dies war durch die hohe Beugungseffizienz der RD-GWS von fast 100% und der hohen Leistungstauglichkeit möglich. In einem weiteren externen Test konnte ein Rekord bezüglich der Effizienz von 96.3% für einen Pulskompressor demonstriert werden [Rum14]. Dafür wurden zwei in dieser Dissertation entwickelte RD-GWS verwendet, die eine Beugungseffizienz von $99.3 \pm 0.2\%$ aufwiesen. Meine Dissertation lieferte auch die wesentlichen Vorarbeiten für die Weiterentwicklung der RD-GWS als Pulskompressionsgitter am IFSW. Untersuchungen dieser dadurch verbesserten Designs zur laserinduzierten Zerstörschwelle laufen derzeit im HIPERDIAS Projekt (www.hiperdias.eu), wobei vorläufige Ergebnisse bereits jetzt

höhere Zerstörschwellen bei 1030 nm Wellenlänge zeigen konnten, als mit goldbeschichteten Gittern möglich sind.

Viel Aufwand floss in die Optimierung des Designs der einzelnen Architekturen der GWS. So konnten die Toleranzanforderungen an die Herstellung der Gitterperiode und den Tastgrades deutlich reduziert werden. Es gelang die zulässige Abweichung im Produktionsprozess von $\pm 1\%$ auf $\pm 7.5\%$ für den Tastgrad und von $+15/-5$ nm auf $+55/-65$ nm für die Ätztiefe enorm zu erhöhen. Dies war möglich bei einer RD-GWS für den resonatorinternen Einsatz unter Littrow-Einfallswinkel, welche in [Pie16, Die18] für die Versuche zur Frequenzkonversion verwendet wurde.

Der Fähigkeit der abgeschiedenen dielektrischen Schichten im Übertragen der sich im Substrat befindlichen Gitterstruktur wurden anhand gebrochener RR-GWS untersucht. Hierbei zeigte sich, dass das RR-GWS Design sehr robust gegenüber einem Verlust an Gitterkontrast ist, welcher in späteren abgeschiedenen Schichten beobachtet wurde. Ein Ätzverfahren wurde untersucht, mit welchem auch nach der eigentlichen Produktion der RD-GWS deren Beugungseffizienz bei der Zielwellenlänge von 1030 nm verbessert werden kann, falls diese durch produktionsbedingte Schwankungen zu gering ausgefallen ist [Dan18].

Alles in allem lieferte meine Dissertation wertvolle Ergebnisse im Hinblick auf den Einsatz von GWS in verschiedenen Anwendungsfeldern der Lasertechnik und legte Grundlagen für die Weiterentwicklung der GWS. So konnte bereits ein neuartiges Stabilisierungskonzept für Scheibenlaser basierend auf GWS im Resonator realisiert werden [Die17].

Auf Grundlage der Ergebnisse wurde ebenso eine Ausgründung des IFSW motiviert (www.martec-photonics.com), die sich der Kommerzialisierung der GWS widmet, sowie ihrer Weiterentwicklung für gegenwärtige und zukünftige Anwendungen in der Lasertechnik.

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

Gorriz, Michael

Adaptive 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

Laserschweißleistung 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 3-519-06227-5

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

Plaaß, 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 Festkörperlaser für den Karosseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

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 3-8316-0460-8

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 Getriebekonstruktion – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Karin Heller

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

Stefan Piehler

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

Felix Abt

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

Volker Rominger

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

Thomas Rataj

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

Michael Diez

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

Andreas Heider

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit 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