

Experimental Investigations on Power Scaling of High-Brightness cw Ytterbium-Doped Thin-Disk Lasers

von Dr.-Ing. Birgit Weichelt
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. 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., 2020

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2021

ISBN 978-3-8316-4914-3

Printed in Germany

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

Table of contents

Table of contents	7
List of symbols	10
Publications	13
Kurzfassung	17
Extended abstract	20
1 Introduction	23
1.1 Motivation	23
1.2 Objectives and approaches followed	24
2 Overview of high-power solid-state laser systems	27
3 Basics of the thin-disk laser technology	30
3.1 Basic principle of the thin-disk laser	30
3.2 Yb-doped laser-active materials for high-power thin-disk lasers	32
3.2.1 Yb:YAG	39
3.2.2 Yb:LuAG	41
3.2.3 Yb:Lu ₂ O ₃	44
3.2.4 Yb:YAB	46
3.3 Crystal properties: manufacturing requirements for high-power thin-disk laser operation	49
3.3.1 Defects implemented by the crystal growth	52
3.3.2 Influence of the polishing on the laser performance	57
3.3.3 Influence of the coating on the laser performance	59
4 Limitations to the power scaling of high-brightness thin-disk lasers	64
4.1 Thermal effects inside the thin-disk crystal	64
4.1.1 Influence of the laser-active material itself on the thermal load	66
4.1.2 Influence of the contact layer and heat-extraction-method	70

4.1.3	Influence of the heat sink on the heat extraction and deformation of thin-disk crystals	72
4.1.4	Influence of the intensity distribution of the pump radiation on the brightness of the laser beam	75
4.2	Thermal effects in front of the thin-disk crystal	79
5	High-precision interferometer to evaluate the optical phase distortions induced by thin-disk crystals during high-power laser operation	82
5.1	Description of the interferometric setup	83
5.1.1	Determination of specific optical properties of Yb:YAG at the wavelength of 375 nm	85
5.1.2	Analysis method of the interferometric measurements	87
5.2	Results of interferometric measurements during high-power laser operation	90
5.2.1	Interferometric measurements to analyze the influence of the ambient atmosphere on thermal effects in front of the thin-disk crystal	90
5.2.2	Interferometric measurements to analyze the influence of the sharpness of the pump spot image on the aspherical contribution to the OPD	93
6	Zero-Phonon-Line pumping of high-power thin-disk lasers	97
6.1	High-power pump source for ZPL-pumping of Yb-doped thin-disk lasers	97
6.1.1	Theoretical background of ZPL-pumping	97
6.1.2	Optical design of the pump source	99
6.1.3	Characterization and performance of the Volume Bragg Gratings	102
6.2	Experimental results of ZPL-pumped Yb:YAG and Yb:LuAG thin-disk crystals	108
6.2.1	CW-multi-mode performance of Yb:YAG and Yb:LuAG thin-disk lasers	109
6.2.2	CW near diffraction-limited performance of Yb:YAG and Yb:LuAG thin-disk lasers	113
6.3	Experimental investigation on ZPL-pumped Yb:Lu ₂ O ₃	114
6.3.1	Analysis of the thermal behavior of ZPL-pumped Yb:Lu ₂ O ₃ disks during fluorescence and laser operation	115
6.3.2	CW multi-mode performance of ZPL-pumped Yb:Lu ₂ O ₃ thin-disk lasers	117

6.3.3	CW high-brightness performance of ZPL-pumped Yb:Lu ₂ O ₃ thin-disk lasers	120
7	Correction of the aspherical optical phase distortions in thin-disk lasers	122
7.1	Aspherical mirrors for the use in thin-disk lasers at multi-kW output power level	122
7.2	Actively-controlled mirrors for the use in thin-disk lasers at multi-kW output power level	129
8	Study of the novel laser-active material Yb:YAB for the use in high-power thin-disk lasers	132
8.1	Characterization of Yb:YAB for the use in thin-disk lasers	133
8.2	Yb:YAB thin-disk lasers in high power CW-operation	136
8.3	Fundamental-mode Yb:YAB thin-disk lasers and wavelength tuning capability	140
9	Summary	144
	References	147
	Acknowledgment	156

Kurzfassung

Diodengepumpte Festkörperlasersysteme haben sich im letzten Jahrzehnt in der Materialbearbeitung immer weiter durchgesetzt, da sie die Vorteile einer faserführbaren Strahlung der Wellenlänge im $1\ \mu\text{m}$ Bereich sowie eine gute Fokussierbarkeit und einer hohen Ausgangsleistung bei hohem Wirkungsgrad miteinander vereinen. Inzwischen sind auch die Anforderungen an industrielle Lasersysteme wie hohe Zuverlässigkeit und eine lange Lebensdauer für diese Systeme umgesetzt worden, so dass deren Einsatz von der Industrie akzeptiert und für bestimmte Anwendungen sogar favorisiert wird. Das Festkörperlaserkonzept des Scheibenlasers hat dabei im Vergleich zu den Faserlasern seine Stärken in einer niedrigeren Sensitivität hinsichtlich Rückreflexen vom zu bearbeitenden Werkstück und einem konzeptbedingten geringeren Auftreten von nichtlinearen Effekten im Lasermedium. Ausgehend von einem am IFSW und DLR erfundenen vielversprechenden Grundkonzept wurde der Scheibenlaser durch Firmen wie z.B. Trumpf und Jenoptik industrietauglich gemacht, indem innovative Entwicklungen im Hinblick auf wichtige Parameter wie Stabilität und Kompaktheit realisiert werden konnten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Kernthema der Verbesserung der Strahlqualität von Scheibenlasern mit optischen Ausgangsleistungen im Kilowattbereich. Dabei wurden Beugungsmaßzahlen im Bereich von $M^2 \approx 8$ für den multi-Kilowattbereich und das Erzielen von Grundmodebetrieb bis zu einer optischen Ausgangsleistung von circa einem Kilowatt angestrebt. Die erstgenannte Strahlqualitäts-Leistungskombination ist insbesondere zum Schneiden von noch feineren Strukturen und mit höheren Distanzen von Blechen interessant, wobei die an zweiter Stelle genannte Kombination unter anderem auf den Einsatz in Ultrakurzpulslasersystem abzielt. Um die im Scheibenlaserresonator erzeugte Strahlqualität optimieren zu können, ist es von essentieller Bedeutung, eine möglichst genaue Information über die Deformation des Scheibenlaserkristalls im Allgemeinen und die Ausprägung der asphärischen Deformation (im 50-200 Nanometerbereich) im Speziellen zu erhalten. Aus diesem Grund wurde ein Interferometeraufbau entwickelt, der auf die bestehenden Anforderungen des Betriebes von Scheibenlasern bei Ausgangsleistungen bis zu mehreren Kilowatt zugeschnitten war und eine präzise Echtzeitmessung der Deformation des Scheibenlaserkristalls ermöglichte. Die aus diesen Messungen erhaltenen Ergebnisse konnten daher direkt zur Optimierung der Strahlqualität des jeweiligen Scheibenlasersystems herangezogen werden.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden die laseraktiven Materialien Yb:YAG, Yb:LuAG, Yb:Lu₂O₃ und Yb:YAB verwendet. Yb:YAG und Yb:LuAG sind von der Qualität der Laserscheiben her industriell einsetzbar, wohingegen sich die laseraktiven Materialien Yb:Lu₂O₃ und Yb:YAB noch im Entwicklungsstadium befinden, aber aufgrund ihrer Eigenschaften neben einem effizienten cw-Betrieb insbesondere für den Einsatz in Ultrakurzpuls-Scheibenlasern prädestiniert sind. Für die vier laseraktiven Materialien wurden neben den spektralen Eigenschaften insbesondere die mechanischen Eigenschaften für den Einsatz im Scheibenlaser analysiert. Als innovatives Pumpkonzept wurde das Zero-Phonon-Line Pumpen für Pumpleistungen bis in den Kilowattbereich und mit einer spektralen Breite von weniger als einem Nanometer experimentell umgesetzt. Dies ermöglichte es, bei Yb:YAG, Yb:LuAG und Yb:Lu₂O₃ die Wärmezeugung im Mittel um ca. 30% zu reduzieren, was durch die längeren Pumpwellenlängen von 969 nm (Yb:YAG, Yb:LuAG) und 976 nm (Yb:Lu₂O₃) im Vergleich zum konventionellen Pumpen im Wellenlängenbereich von 940-950 nm bedingt ist. Die dadurch bedeutend geringeren thermisch induzierten Verformungen, insbesondere der asphärischen Verformung, des Scheibenlaserkristalls erlaubt neben einer Steigerung der optischen Effizienz die Beugungsverluste des Scheibenlaserresonators so stark zu reduzieren, dass Grundmodebetrieb bis in den Kilowattbereich möglich ist. Unter Verwendung dieses Pumpkonzeptes wurde ein Yb:LuAG Scheibenlaser mit einer optischen Ausgangsleistung von 742 W und nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität ($M^2 \approx 1.5$) bei einer gleichzeitig hohen optischen Effizienz von 58.5% demonstriert. Im Multimodebetrieb ($M^2 \approx 15$) konnte unter Verwendung von Yb:YAG ein Scheibenlaser mit einer optischen Effizienz von 72% realisiert werden. Mit dem Zero-Phonon-Line Pumpen von Yb:Lu₂O₃ konnte mit einer optischen Ausgangsleistung von 670 W die bis dato höchste mit diesem laseraktiven Material realisierte Ausgangsleistung gezeigt werden. Neben dem hohen Potential von Yb:Lu₂O₃ für den Einsatz im Scheibenlaser wurden jedoch auch dessen (momentane) Limitierungen in der Kristallqualität dargestellt, was für eine Erzeugung von beugungsbegrenzter Strahlung bis in den Kilowattbereich hinderlich ist.

Da ab einem bestimmten Ausgangsleistungslevel für die Erzeugung guter Strahlqualität immer eine Kompensation der asphärischen Deformation des Scheibenlaserkristalls notwendig wird, wurden experimentelle Untersuchungen zur Verwendung statischer Asphärenspiegeln durchgeführt. Diese wurden so konzipiert, dass sie bis zu mehreren Kilowatt Ausgangsleistung des Scheibenlasers eingesetzt werden konnten. Unter Verwendung eines Asphärenspiegels im Resonator, wurde ein Yb:YAG Scheibenlaser (eine Scheibe) mit einer optischen Ausgangsleistung von 3.4 kW und einem Strahlparameterprodukt von 2.4 mm x mrad ($M^2 \approx 8$) realisiert. Auf diesen Experimenten konnte am IFSW bei der weiteren Entwicklung von aktiv regulierten, asphärischen Spiegeln für

den Einsatz im Scheibenlaser aufgebaut werden.

Die Forschung an neuartigen Lasermaterialien zur Verwendung im Scheibenlaser konzentriert sich neben den Materialien die vorteilhafte thermische Eigenschaften besitzen vor allem auf jene, die insbesondere zur Erzeugung von ultrakurzen Pulsen geeignet sind. Ein laseraktives Material, das beides bietet, ist $\text{Yb:YAl}_3(\text{BO}_3)_4$, mit welchem zum ersten Mal ein Betrieb im Scheibenlaser gezeigt werden konnte. Im cw-Multimodebetrieb wurden dabei optische Ausgangsleistungen bis zu 109 W mit einer optischen Effizienz von 50.2% realisiert. Im niedrigeren Leistungsbereich von ≈ 20 W wurde mit Yb:YAB sogar eine optische Effizienz von über 60% erzielt. Durch Verwendung eines resonanten Beugungsgitters wurde für den Yb:YAB Scheibenlaser eine spektrale Durchstimbarkeit im Bereich von 1001 bis 1053 nm ermittelt (maximale optische Ausgangsleistung von 36 W bei 1040 nm). Aufgrund dieser großen spektrale Breite ist Yb:YAB für zukünftige Experimente in Ultrakurzpulsscheibenlasern interessant.

Extended abstract

In the last decade, diode-pumped solid-state laser systems became more and more established and are nowadays widely used for material processing in the automotive, solar and microelectronic industry. They can produce the desired combination of fiber guidability, highly focused beams, high power and a high optical efficiency. Meanwhile, also the demands of industrial laser systems like a long lifetime and a low failure rate got realized so that the use of diode-pumped solid-state lasers is widely accepted by the companies and for certain applications even favored. Comparing the two solid state laser concepts disk and fiber, the thin-disk laser has its strength in a lower sensitivity to back reflections from the work piece and in a design-based lower occurrence of nonlinear effects inside the laser-active medium which is advantageous for pulsed laser systems. Starting from the invention of a promising new laser concept at the IFSW and DLR, the thin-disk laser emerged to a robust industrial system since innovative developments with regard to important aspects like stability and compactness were realized thanks to several companies such as for example Trumpf and Jenoptik.

The core topic of the present thesis is the improvement of the brightness of thin-disk lasers at a targeted output power of one kilowatt and beyond. For an output power of several kilowatts the intention was to approach a beam quality factor of $M^2 \approx 8$, whereas for the thin-disk lasers with an optical output power up to one kilowatt a near diffraction limited beam quality was aimed. Multi-kilowatt beams with high brightness offer advantages for fast and precise material processing applications such as remote cutting, where the beam must propagate over large distances. In the second case a thin-disk laser generating ultrashort pulses can be developed in a further stage. In order to improve the beam quality of a thin-disk laser it is essential to know very precisely how the thin disk deforms in laser operation whereby special attention has to be paid on the aspherical part of this deformation which can be in the order of a few tens of Nanometers. For this reason, an interferometric setup was developed which was optimized to measure the disk deformation during laser operation with high precision. Thus, interferometric measurements in real-time could be carried out when operating the different thin-disk lasers up to an optical output power of approximately four kilowatt. The obtained results were directly used to optimize the beam quality of each thin-disk laser individually.

For the experimental investigations the laser-active materials Yb:YAG, Yb:LuAG,

Yb:Lu₂O₃ and Yb:YAB have been used. Thin-disk laser crystals out of Yb:YAG and Yb:LuAG are available in a quality which is sufficient to implement them in industrial laser systems. On the contrary, the quality of the crystals has still to be improved to achieve high quality laser disks for the laser-active materials Yb:Lu₂O₃ and Yb:YAB. However, beside a high optical efficiency, these materials provide properties which are favorable for the generation of ultrashort pulses. Beside a comprehensive analysis of the spectral properties of the four laser-active materials, close attention was paid on the mechanical ones particularly with regard to the manufacturing of laser disks.

The innovative concept of Zero-Phonon-Line (ZPL) pumping was experimentally implemented to allow for pump powers of up to ≈ 2 kW at a narrow wavelength peak with a width of less than one Nanometer. The pumping of the laser-active materials Yb:YAG, Yb:LuAG and Yb:Lu₂O₃ at the ZPL-line allows to reduce the heat generation in the disk by approximately 30% which is due to the longer pump wavelength of 969 nm (Yb:YAG, Yb:LuAG) and 976 nm (Yb:Lu₂O₃) compared to the conventional pumping in the wavelength range of 940-950 nm. For this reason, the thermally induced deformations of the thin-disk crystal are strongly reduced and the Stokes efficiency is increased. Especially the reduction of the aspherical phase distortions which result in significantly lower diffraction losses of the fundamental mode is essential for the scaling of fundamental-mode thin-disk lasers to the kilowatt output power level. Using the ZPL-pump concept, a Yb:LuAG thin-disk laser with an optical output power of 742 W and nearly diffraction limited beam quality ($M^2 \approx 1.5$) together with an unprecedented high optical efficiency of 58.5% was demonstrated. For an Yb:YAG laser in multimode operation ($M^2 \approx 15$), this pumping principle allowed to achieve a maximum optical efficiency of 72%. Kilowatt-level ZPL-pumping of an Yb:Lu₂O₃ thin-disk laser resulted in 670 W of output power which is the highest optical output power reported to date for this laser-active material. Despite the discussion of the high potential of the implementation of Yb:Lu₂O₃ for the use in thin-disk lasers, also (current) limitations especially regarding the crystal quality are addressed in this thesis. The insufficient crystal quality currently limits the generation of fundamental-mode radiation at high output powers with this laser-active material.

Despite of the advantages of ZPL-pumping, at a certain output power level a compensation of the aspherical phase front deformation induced by the thermally deformed thin-disk crystal will always be necessary. Therefore, experimental investigations with static aspherical mirrors have been carried out. These mirrors have been designed in such a way that they can be used in thin-disk lasers operating at several kilowatts of output power. Using an aspherical mirror in the resonator, an Yb:YAG thin-disk laser generating an output power of 3.4 kW and a beam parameter product of 2.4 mm x mrad ($M^2 \approx 8$) from one disk was demonstrated. Based on the gained knowledge from the in-

vestigations with the static aspherical mirrors, actively-controlled mirror concepts were developed later on at the IFSW.

Current research focuses on novel laser-active materials with beneficial properties to obtain for e.g. a lower thermal load or to generate ultrashort pulses. An interesting laser-active material which offers both is Yb:YAl₃(BO₃)₄. Therefore, the first demonstration of a thin-disk laser using Yb:YAB was carried out. In multimode operation cw-output powers of up to 109 W with an optical efficiency of 50.2% were achieved. At a lower power level of about 20 W this laser-active material showed an even more efficient operation with an optical efficiency of more than 60%. In fundamental-mode operation the extracted output power was 10.4 W with an optical efficiency of 44.5% and a nearly diffraction limited beam ($M^2= 1.39$). The broad emission bandwidth of the material was confirmed by measuring a continuous wavelength tuning range from 1001 to 1053 nm by using a resonant diffraction grating in the resonator. The maximum output power of 36 W was obtained at a wavelength of 1040 nm. Due to this broad spectral width, Yb:YAB is attractive for the generation of ultrashort pulses. This will be investigated in future experiments at the IFSW.

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

Pließ, 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

Pulseenergiestabilität 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 Strahlweiche
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 Röhner

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