

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich

von Dr.-Ing. Jan-Philipp Negel
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. 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., 2017

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2017

ISBN 978-3-8316-4632-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

Inhalt

Inhalt	5
Symbolverzeichnis	7
Kurzfassung der Arbeit	11
Extended Abstract	15
1 Stand der Technik	19
1.1 Stand der Technik für Hochleistungs-UKP-Laser und ihre Limitierungen	20
1.1.1 Oszillatoren	20
1.1.2 Faser- und Slabverstärker	22
1.1.3 Scheibenlaserverstärker	24
1.1.3.1 Regenerative Verstärker	24
1.1.3.2 Multipassverstärker	25
1.2 Stand der Technik für UKP-Laser im grünen und ultravioletten Spektralbereich	26
1.2.1 Zweite Harmonische	26
1.2.2 Dritte Harmonische	26
2 Zielsetzung	28
2.1 Vorteile des Multipassverstärkerkonzepts	28
2.2 Zielsetzung für den Scheibenlaser-Multipassverstärker	29
2.3 Zielsetzung für die Frequenzkonversion	32
3 Der Scheibenlaser-Multipassverstärker	36
3.1 Konzeptionierung und Modellierung	36
3.1.1 Randbedingungen für die Verstärkerauslegung	36
3.1.2 Analyse der Strahlpropagation	39
3.1.2.1 Die quasi-kollimierte freie Propagation (QKFP) . .	40
3.1.2.2 Vergleich zu konventionellen Propagationskonzepten	44
3.1.2.3 Simulation des Intensitätsprofils	50

3.1.3	Verstärkungsprozess	56
3.2	Aufbau des Multipassverstärkers und technische Herausforderungen	60
3.2.1	Aufbau des Systems	60
3.2.2	Thermische Effekte und deren Minimierung	63
3.2.2.1	Das retroreflektierende Spiegelpaar (RMP)	63
3.2.2.2	Pumpen auf der „Zero-phonon-line“ (ZPL)	68
3.3	Experimentelle Ergebnisse	70
3.3.1	Skalierung der Ausgangsleistung und Pulsenergie	71
3.3.2	Strahlqualität und Polarisationserhaltung	76
3.3.3	Erklärung für Leistungsbegrenzung	80
3.3.4	Zeitliches und spektrales Verhalten der Pulse	81
3.3.5	Langzeitstabilität	83
3.4	Zweite Generation des Multipassverstärkers	85
3.4.1	Aufbau	85
3.4.2	Mit der zweiten Generation des Multipassverstärkers erzielte Ergebnisse	87
3.5	Verstärkung von Femtosekundenpulsen	89
3.5.1	Aufbau	89
3.5.2	Ergebnisse mit Femtosekundenpulsen und Einfluss des B- Integrals	92
3.6	Vergleich der Ergebnisse mit dem Stand der Technik	98
4	Frequenzkonversionsexperimente	102
4.1	Frequenzverdopplung (grün)	102
4.1.1	Experimenteller Aufbau (grün)	102
4.1.2	Resultate (grün)	104
4.2	Summenfrequenzzeugung (UV)	108
4.2.1	Experimenteller Aufbau (UV)	108
4.2.2	Resultate (UV)	110
4.3	Vergleich der Ergebnisse mit dem Stand der Technik	114
5	Zusammenfassung und Ausblick	116
5.1	Scheibenlaser-Multipassverstärker	116
5.2	Frequenzkonversion	118
5.3	Wissenschaftliche und industrielle Anwendungen	119
	Literaturverzeichnis	121
	Danksagungen	130

Kurzfassung der Arbeit

In den letzten Jahren hat sich die Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern (UKP-Laser) als industrielles Verfahren etabliert, beispielsweise für die Mikrostrukturierung von Oberflächen [1] oder das Bohren sehr feiner Löcher [2]. Ein bedeutender Faktor für die Produktivitätssteigerung in der UKP-Lasermaterialbearbeitung ist die verfügbare Ausgangsleistung der Strahlquelle, da höhere Leistungen beispielsweise schnellere Vorschübe erlauben.

Zu Beginn der Arbeit betrug die Ausgangsleistung kommerziell erhältlicher UKP-Lasersysteme auf Scheibenlaserbasis ca. 50-100 W. Auf anderen Laserarchitekturen (Faser- und Slabverstärker) basierende UKP-Systeme erzeugten im Labor bis zu 1,1 kW Ausgangsleistung bei vergleichsweise kleinen Pulsenergien. Ziel der Arbeit war es das Potential von Scheibenlasern hinsichtlich ihrer Leistungsskalierbarkeit zu nutzen und erstmals eine UKP-Laserquelle (Pulsdauer < 10 ps) auf Scheibenlaserbasis mit mehr als 1 kW Ausgangsleistung zu demonstrieren. Dies wurde realisiert durch das Konzept des Multipassverstärkers, welcher ohne optische Schalter auskommt und daher eine gute Leistungsskalierbarkeit, eine hohe Flexibilität bezüglich Repetitionsrate und, im Vergleich zu anderen Laserarchitekturen, eine sehr hohe Pulsenergie bei der gewünschten Ausgangsleistung ermöglicht. Ein weiteres Ziel der Arbeit war die Frequenzkonversion der vom Multipassverstärker erzeugten Laserpulse in den grünen und ultravioletten Spektralbereich. Daraus ergeben sich Vorteile für die Lasermaterialbearbeitung, da durch die bessere Fokussierbarkeit prinzipiell kleinere Strukturen erzeugbar sind. Weiterhin bieten viele Materialien eine höhere Absorption im grünen oder ultravioletten Spektralbereich als im Infraroten. Voraussetzung für die Einsetzbarkeit von Laserstrahlung mit diesen Wellenlängen ist allerdings eine genügend hohe Ausgangsleistung, um eine gute Produktivität zu erreichen. Ziel der Arbeit war daher eine Frequenzverdopplung der Ausgangsstrahlung des Multipassverstärkers zu erstmals mehr als 500 W bei einer Wellenlänge von 515 nm. Weiterhin sollten erstmals mehr als 100 W bei einer Wellenlänge von 343 nm durch Frequenzverdreifung erzielt werden.

Der Seedlaser (6,5 ps Pulsdauer, 300-800 kHz Repetitionsrate, 115 W Ausgangsleistung) des Multipassverstärker war ein modifizierter kommerzieller TruMicro5050 der Firma Trumpf Laser GmbH. Der Multipassverstärker selbst wurde zunächst konzeptionell ausgelegt, wobei für die Strahlpropagation das Konzept der quasi-

kollimierten Propagation (QKFP) ausgearbeitet, untersucht und verwendet wurde. Hierdurch konnte der Einfluss von Nichtlinearitäten deutlich gesenkt werden. Mit Hilfe einer Matrix von Spiegeln wurden hier 40 Übergänge über die Scheibe realisiert. Dabei wurde eine maximale Ausgangsleistung von 1,4 kW bei 8 ps Pulsdauer und einer Repetitionsrate von 300 kHz (4,7 mJ Pulsenergie) demonstriert. Damit stellte das System die erste auf Scheibenlasertechnologie basierende UKP-Laserquelle mit einer Ausgangsleistung von mehr als 1 kW dar. So konnte die exzellente Eignung von Multipassverstärkern auf Scheibenlaserbasis zur Skalierung der Ausgangsleistung von UKP-Laserquellen in den Kilowattbereich demonstriert werden. Weiterhin ermöglichte das System neben der Leistungsskalierung eine gleichzeitige Skalierung der Pulsenergie in den mJ-Bereich ohne den Einsatz von CPA-Systemen und ohne signifikante Verschlechterung der Strahlqualität. Dies ist ein bedeutender Vorteil gegenüber anderen UKP-Laserkonzepten mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich (Faser, Slab). Im Repetitionsratenbereich des Seedlasers von 300-800 kHz waren die Ausgangsleistung und die Pulsenergie unabhängig voneinander skalierbar, was den konzeptionellen Vorteil des Multipassverstärkers, keine optischen Schalter zu benötigen, ebenso bestätigte. Weitere Erkenntnisse bezüglich des Managements von thermischen Effekten konnten gewonnen werden. Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage für die verbesserte Konstruktion eines Multipassverstärkers der zweiten Generation. In diesem System wurden 60 Reflexionen an der Scheibe verwendet. Der Verstärker erzielte eine maximale Ausgangsleistung von 2 kW bei einer gemessenen Pulsdauer von 8 ps und einer Repetitionsrate von 300 kHz. Die Pulsenergie betrug dabei 6,8 mJ. Dieses Ergebnis stellt die höchste Ausgangsleistung aller bislang bekannten UKP-Lasersysteme (Pulsdauern unter 100 ps) dar. Die Langzeitstabilität des Verstärkers konnte im Vergleich zum System der ersten Generation deutlich gesteigert werden. In einem weiteren Experiment wurden zudem die Auswirkungen eines Seedlasers mit Pulsdauern im fs-Bereich untersucht.

Bei den Experimenten zur Frequenzkonversion wurden Rekordausgangsleistungen für UKP-Festkörperlaser im grünen Spektralbereich (515 nm) und ultravioletten Spektralbereich (343 nm) erzielt, bei gleichzeitig vergleichsweise sehr hoher Pulsenergie. Die Frequenzverdopplungsexperimente in einem LBO-Kristall ergaben eine maximale Ausgangsleistung von 820 W bei 2,7 mJ Pulsenergie und einer Wellenlänge von 515 nm. Durch eine Summenfrequenzzeugung zwischen den Wellenlängen von 1030 nm und 515 nm in einem zweiten LBO-Kristall wurden 234 W Ausgangsleistung und 780 μ J Pulsenergie bei einer Wellenlänge von 343 nm erreicht.

Die erzielten Ergebnisse des Multipassverstärkers bieten mit der Kombination von mehr als 1 kW Ausgangsleistung und Pulsenergien im mJ-Bereich für die Präzi-

sionsmaterialbearbeitung prinzipiell eine signifikante Erhöhung der Produktivität. Nach Fertigstellung wurde das Lasersystem in Zusammenarbeit mit der Verfahrensentwicklung des Instituts für Strahlwerkzeuge in eine Anlage integriert. Dort wurde durch Freitag et al. [3] am Beispiel des Schneidens von Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK) die exzellente Eignung des Systems zur Erhöhung der Produktivität bestätigt. Weiterhin erlauben die gewonnenen Erkenntnisse eine Fortführung der Forschung an Multipassverstärkern zur weiteren Steigerung der mittleren Leistung (IR, grün und UV), Pulsenergie und Pulsspitzenleistung, auch mit Femtosekundenpulsen. Sie bilden so die Grundlage für eine mögliche Kommerzialisierung von UKP-Scheibenlaser-Multipassverstärkern.

Extended Abstract

Over the last years, material processing with ultrashort pulsed (USP) lasers has become a well established industrial technology. Applications include microstructuring of surfaces [1] or drilling of very small holes [2]. In order to increase productivity in material processing with USP lasers, higher processing speeds are desired. Therefore, the available output power of USP laser sources has to be increased.

At the start of this work, commercially available laser sources based on thin-disk laser technology had an output power of about 50-100 W. Scientific ultra short pulsed lasers based on other laser architectures (fiber and slab amplifiers) were demonstrated with up to 1.1 kW of output power but showed comparatively small pulse energies. Therefore, the aim of this work was to use the potential of the thin-disk laser architecture regarding power scalability and to demonstrate for the first time a USP thin-disk laser source (pulse durations <100 ps) with more than 1 kW of output power. This was achieved by using the concept of a thin-disk multipass amplifier. Here, no optical switches are required. Thus, this concept shows a very good power scalability, a high flexibility regarding repetition rate and it allows for higher pulse energies at this power level compared to other laser architectures. Another aim of this work was to frequency convert the output pulses of the multipass amplifier into the green and ultraviolet spectral region. This is advantageous for laser material processing as smaller wavelengths lead to a better focussability and thus smaller structures on the work piece can be realized. Furthermore, a lot of materials possess a higher absorption for green or UV laser pulses than for infrared beams. However, the use of lasers at these wavelengths requires high output powers as well to achieve a high productivity. Thus, the aim of this work was the first demonstration of a USP solid state laser with more than 500 W at the frequency-doubled wavelength of 515 nm. Furthermore, more than 100 W were to be achieved for the first time at the third harmonic wavelength of 343 nm.

In the experiments, a modified commercially available TruMicro5050 from Trumpf Laser GmbH was used as seed laser (6.5 ps pulse duration, 300-800 kHz repetition rate, 115 W output power). For the multipass amplifier a concept was developed and modelling was performed. The concept for beam propagation is based on a quasi-collimated free propagation approach (QKFP) which allows to significantly reduce the influence of nonlinearities in the amplifier. Using an array of 40 mirrors

opposing the thin-disk crystal, a total of 40 reflections on the disk could be realized. With this, a maximum output power of 1.4 kW with pulse durations <8 ps and at a repetition rate of 300 kHz (4.7 mJ pulse energy) was demonstrated. The system was the first demonstration of an USP laser source based on thin-disk technology with more than 1 kW of output power. This shows the excellent suitability of thin-disk multipass amplifiers to scale up the output power of USP laser sources into the kilowatt output power range. Furthermore, the system allowed at the same time to scale the pulse energy into the mJ-range without the need for chirped-pulse amplification or any significant degradation in beam quality. This proves to be a significant advantage in comparison to other laser architectures with output powers in the kW-range (fiber, slab). In the repetition rate range between 300 and 800 kHz, the output power and pulse energy were scalable independently. This is a validation of the conceptual advantage of multipass amplifiers that do not to require any optical switches. Further experiments were performed regarding the management of thermal effects in the amplifier. Based on these results, an improved second generation multipass amplifier was developed. Here, 60 reflections on the disk were employed. The amplifier delivered a maximum output power of 2 kW at a measured pulse duration of 8 ps at a repetition rate of 300 kHz leading to a pulse energy of 6.8 mJ. This is - to the best of my knowledge - the highest output power of a USP laser source with pulse durations below 100 ps reported so far. Furthermore, the long-term stability of the system could be significantly improved. Additionally, in another experiment the effect of using a femtosecond laser source as seed laser was investigated.

During the experiments on frequency conversion, record output powers for USP solid state lasers were achieved in the green (515 nm) and ultraviolet (343 nm) spectral region with comparatively high pulse energies. Here, frequency-doubling in an LBO-crystal led to a maximum output power of 820 W with 2.7 mJ of pulse energy and at a wavelength of 515 nm. Using sum frequency generation between radiation at the wavelength of 1030 nm and 515 nm in a second LBO-crystal, a maximum output power of 234 W and a pulse energy of 780 μ J was demonstrated at a wavelength of 343 nm.

The results of the experiments with the multipass amplifier pave the way for higher productivity in precision laser material processing using the combination of more than 1 kW of output power and at the same time pulse energies in the mJ-range. After the completion of this laser system, it was integrated into a work station in cooperation with the process development department of the IFSW. Here, for example, experiments performed by Freitag et al. [3] proved the system to be well suited for cutting of carbon fiber reinforced plastics at unprecedented high cut-

ting speeds. Additionally, the results on the multipass amplifier allow for further research on thin-disk multipass amplifiers with even higher output powers. Furthermore, the lessons learned can be used as the basis for a commercialisation of this kind of amplifiers.

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 Festkörperlasern 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

Schinzl, 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

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