

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

M. Eckerle  
Generation and amplification  
of ultrashort pulsed high-power  
cylindrical vector beams

# **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.

# **Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams**

von Dr.-Ing. Michael Eckerle  
Universität Stuttgart



utzverlag München

Als Dissertation genehmigt  
von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth

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 978-3-8316-4804-7

Printed in Germany

utzverlag GmbH, München  
Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Contents

<b>Contents</b>	<b>5</b>
<b>List of Symbols</b>	<b>8</b>
<b>Abstract</b>	<b>12</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>15</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>20</b>
<b>2 State of the art</b>	<b>22</b>
2.1 Extra-cavity generation of CVBs . . . . .	22
2.2 Intra-cavity generation of CVBs in continuous wave operation . . . . .	24
2.3 Intra-cavity generation of CVBs in pulsed operation . . . . .	25
2.4 Amplification of CVBs . . . . .	26
<b>3 Objective of this work</b>	<b>27</b>
3.1 Polarization state . . . . .	28
3.2 Pulsed operation . . . . .	28
3.3 Laser technology . . . . .	29
<b>4 Cylindrical vector beams</b>	<b>31</b>
4.1 Vortex versus cylindrical vector beams . . . . .	31
4.2 Evaluation of the polarization purity . . . . .	34
<b>5 Radially polarized mode-locked thin-disk laser</b>	<b>42</b>
5.1 Considerations regarding the behavior of the SESAM . . . . .	42
5.1.1 Saturation . . . . .	42
5.1.2 Damage threshold . . . . .	45
5.2 Grating waveguide output coupler . . . . .	47
5.2.1 Design . . . . .	47
5.2.2 Production and qualification . . . . .	49
5.3 Effects of an intra-cavity phase shift . . . . .	52
5.4 Considerations regarding the cavity design . . . . .	55

5.5	Setup . . . . .	56
5.6	Experimental results . . . . .	58
5.6.1	Performance in continuous wave operation . . . . .	60
5.6.2	Performance in mode-locked operation . . . . .	61
5.7	Summary . . . . .	66
<b>6</b>	<b>High-power single-stage single-crystal fiber amplifier</b>	<b>69</b>
6.1	Single-crystal fiber module . . . . .	70
6.2	Kerr lens self-focussing . . . . .	70
6.3	High-power pumping . . . . .	73
6.4	Setup . . . . .	76
6.5	Experimental results . . . . .	77
6.6	Summary . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Summary and outlook</b>	<b>89</b>
<b>Bibliography</b>		<b>92</b>
<b>Acknowledgements</b>		<b>101</b>

# Abstract

Due to their unique properties, the cylindrical vector beams (CVB) with their axially symmetric polarization state, and in particular the  $LG_{01}^*$  mode with its doughnut-shaped intensity distribution, have shown their potential in various applications such as e.g. particle trapping and the excitation of plasmons in rotationally symmetric structures [1] or the acceleration of electrons [2].

Particularly in several applications in the field of laser material processing the performance could be improved by using a CVB instead of a linearly or circularly polarized Gaussian beam. For example, depending on the process and processed material, the cutting speed and quality can be improved for laser cutting with a CO<sub>2</sub> laser [3, 4]. For laser drilling applications with pulsed laser sources e.g. increased drilling speeds of 1.5 - 4 times could be demonstrated [5].

As a consequence of the disparity of the promising results and the small number of existing data on this matter, the European Union supported the project RAZIPOL, which started in 2013. To further investigate surface structuring of large areas and the drilling of wholes with a large aspect ratio, a system delivering several 100 W of average output power with an either radially or azimuthally polarized output beam was built. To obtain such a performance, a system composed of a seed laser, several single-crystal fiber (SCF) stages, and a subsequent thin-disk multipass (TDMP) amplifier was set up. The radial or azimuthal polarization of the output beam was realized by means of a polarization converter within the preamplifier stage. Even though the results achieved within RAZIPOL were impressive, it turned out that the high level of complexity of the seed system can cause problems in terms of long-term stability and the quality of the CVB.

Therefore, the aim of the present work was to develop an alternative seed system. Especially a reduced complexity, compared to the RAZIPOL system, and a good beam quality of the CVB, in terms of the homogeneity of the intensity and the radial polarization distribution, were the target. The latter is necessary as it strongly affects the final quality of the CVB after the amplification in the TDMP. The minimum targeted output power was 50 W and determined by the requirements of the TDMP amplifier.

To realize the desired results, a combination of a mode-locked thin-disk oscillator and a subsequent SCF amplifier was chosen. The thin-disk technology was used due to the power scalability of the concept. Mode-locked operation was achieved by means of a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). To obtain the radial polarization of the output beam of the system a grating waveguide mirror was used. This device is a grating mirror which additionally employs a waveguiding effect in its dielectric layers to achieve the desired polarization dependent reflectivity. The spectral behavior is modelled by varying the parameters of the grating and the layers. Until the beginning of this work, at the IFSW these devices were only used as highly-reflective mirrors at one end of the cavity in conjunction with a standard output coupler at the other end. As this time the SESAM already had to be positioned at one end of the cavity to obtain stable single-pulse operation, the grating waveguide mirrors' parameters had to be adapted, such that it could additionally act as an output coupler with the desired reflectivity. Due to the grating waveguide nature of the device and its use as an output coupler, the device is called "Grating Waveguide Output Coupler" (GWOC). As already mentioned before, one SCF amplifier stage was used to boost the output of the oscillator to the power level required by the TDMP. Compared to the SCF stages in RAZIPOL, a crystal with a lower doping concentration was chosen. This was done to diminish the thermal load in the crystal and thus, to reduce detrimental thermal effects which can negatively affect the CVB quality.

With this approach, the first mode-locked thin-disk oscillator with a radial output polarization could be demonstrated. A maximum output power of 13.3 W was achieved at a pump power of 61 W. The maximum average output power was limited by the onset of instabilities in the mode-locking process and the intensity distribution of the beam. The pulse repetition rate of the oscillator was 42.1 MHz, which resulted in a pulse energy of 316 nJ. Under the assumption of a  $\text{sech}^2$ -shape of the pulses, a pulse duration of 907 fs was measured. This results in a pulse peak power of 0.31 MW. In terms of average output power, peak power and pulse duration these values were records for pulsed oscillators generating CVBs. The pulse energy was formerly only exceeded by Q-switched CVB systems. At the same time, the obtained homogeneity of the doughnut-shaped intensity distribution as well as the high degree of radial polarization (DORP) of  $97 \pm 1\%$  were unprecedented for such a pulsed oscillator system. With measured values of the  $M^2$  below 2.1 this parameter was also close to the theoretical case.

As mentioned before, the oscillator output was boosted in a subsequent SCF amplifier. For this amplifier stage, two different pump diodes with nominal wavelengths of 940 nm and 969 nm were tested. Surprisingly, the diode with an emission wavelength of 940 nm lead to a better performance in terms of output power. With this particular diode an average output power of the amplifier of 69.7 W was obtained at a pump power of 482 W.

---

In comparison, with the second diode an average output power of 66.3 W was achieved for a pump power of 519 W. The pulse durations after the amplification were 1030 fs and 909 fs, respectively. The different values were a result of a variation of the pulse duration of the seed source, which was 938 fs in the experiment with the 940 nm diode and 800 fs in the experiment with the 969 nm diode. This resulted in pulse energies of  $1.68\mu\text{m}$  (940 nm) and  $1.63\mu\text{m}$  (969 nm) and corresponding pulse peak powers of 1.48 MW and 1.58 MW, respectively. While the gain of 5.2 was larger in the first experiment (compared to 5.0), the long-term stability was better when pumping at 969 nm. The values of the  $M^2$  slightly increased to 2.1-2.4 in both experiments with the SCF booster. Additionally, the beams became slightly distorted and developed a minor astigmatism. As a result of a linear phase shift inside the SCF crystal and a subsequent optical component, the transmitted beams were polarized in the so-called "hybrid1" (H1) polarization. The degrees of H1 polarization were  $96.4\pm1\%$  and  $96.1\pm1\%$  for the case of pumping at 940 nm and 969 nm, respectively. To show that such a phase shift can easily be compensated, a half-wave plate was introduced in front SCF in the setup with the 969 nm diode. This resulted in a degree of radial polarization of the amplified beam of  $94.1\pm1\%$ , while the other parameters stayed unaffected by the compensation. Despite the minor degeneration of the quality of the beam and the polarization state, the results are still very promising. Thus, an alternative seed system with a reduced complexity and a good beam quality was successfully realized.

## Kurzfassung

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte entwickelte sich ein immer größeres Interesse an Laserstrahlen mit axial-symmetrischen Polarisationszuständen, den sogenannten "cylindrical vector beams" (CVB). Vor allem die  $LG_{01}^*$  Mode, mit ihrer Doughnut-ähnlichen Intensitätsverteilung, ist dabei von besonderem Interesse für die verschiedensten Anwendungen. So kann diese beispielsweise für das Einfangen von Partikeln oder zur Anregung von Oberflächenplasmonen auf rotationssymmetrischen Strukturen verwendet werden [1]. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass ein solcher Strahl, unter der Verwendung einer Linse mit einer sehr hohen numerischen Apertur, auf einen extrem kleinen Durchmesser fokussiert werden kann. Bei einer ausreichenden Größe der numerischen Apertur kann dieser sogar signifikant kleiner werden als das theoretische Minimum eines Strahls mit homogener linearer Polarisation [6,7]. Dieser Effekt ist auf eine longitudinale z-Komponente des Laserstrahls zurückzuführen, die sich im Bereich der Strahltaille ausbildet und große Anteile der Laserleistung beinhalten kann. Bei einer azimutalen Polarisation des Laserstrahls bildet sich diese Komponente hingegen nicht aus. Theoretisch kann dies im Bereich der Strahltaille dazu genutzt werden, die Intensitätsverteilung, durch eine Anpassung des Verhältnisses von radialer und azimutaler Polarisation, zu modellieren [8]. Bei ausreichend hohen Spitzenleistungen im gepulsten Betrieb werden Strahlen mit dieser speziellen Polarisationsform zudem interessant in Applikationen zur Beschleunigung von Partikeln wie zum Beispiel Elektronen [2,9], Ionen [10] und Protonen [11].

Die positiven Eigenschaften die sich durch diese Polarisationsformen für die Laser-Materialbearbeitung ergeben können, wurden schon 1999 von Niziev und Nesterov theoretisch aufgezeigt [12]. So sagten Sie eine erhöhte Schneidgeschwindigkeit voraus, wenn statt eines Laserstrahls mit einer linearen oder zirkulären Polarisierung, ein Laserstrahl mit einer radialen Polarisierung verwendet würde. 2010 wurde die Richtigkeit dieser Hypothese für einige Materialien nachgewiesen [3]. Dabei zeigte sich für einen radial polarisierten Laserstrahl eines CO<sub>2</sub>-Lasers im Dauerstrichbetrieb eine Verbesserung des Schneidprozesses, verglichen mit der Verwendung eines Laserstrahls mit zirkularer Polarisierung. In Abhängigkeit vom bearbeiteten Material, konnte dadurch entweder die Bearbeitungsgeschwindigkeit um 50 % erhöht werden, die Qualität des Schnittes wurde verbessert oder weniger Edelgas wurde für den Prozess benötigt. Kurz darauf wurden am IFSW Experimente mit einem radial polarisierten CO<sub>2</sub>-Laser mit Laserleistungen bis

zu 3 kW durchgeführt. Dabei konnten vergleichbare Ergebnisse für weitere Materialien und Prozesse erzielt werden. Zum Beispiel konnte die Bearbeitungsgeschwindigkeit beim Laserstrahlschweißen um 33 % erhöht werden, ohne dabei die Spritzerbildung zu verstärken.

Bereits 2007 wurden die Vorteile einer azimutal polarisierten  $LG_{01}^*$  Mode für das Laserstrahlbohren mittels eines gepulsten Lasers untersucht [5]. Dabei kam ein Gütegeschalteter Nd:YAG Laser zum Einsatz, der Nanosekunden-Pulse erzeugte. Verglichen mit der Anwendung linearer oder zirkularer Polarisation, konnten in Abhängigkeit von der Dicke des bearbeiteten Materials, 1,5 bis 4 mal höhere Bohrgeschwindigkeiten erzielt werden. Vergleichbare Vorteile wurden außerdem beim Bohren von Mikrolöchern mit einem gepulsten Yb:YAG System nachgewiesen [13]. Dabei zeigten sich, je nach Dicke der bearbeiteten Bleche, Vorteile für Laserstrahlen mit radialer (für Blechdicken unter 0,5 mm) oder azimutaler (für Blechdicken über 1 mm) Polarisation. Die Vorteile dieser speziellen Strahl- bzw. Polarisationsformen beschränken sich dabei nicht ausschließlich auf die Bearbeitung von Metallen. So wurde beispielsweise gezeigt, dass das Bohren von Mikrolöchern in SiO<sub>2</sub> und reines Silizium die höchste Effizienz unter der Anwendung eines azimutal polarisierten Laserstrahls aufweist [14]. Bei den Versuchen kam ein modengekoppelter TiSa-Laser zum Einsatz. Weitere Untersuchungen wurden zum Bohren in Karbonfaserverstärktes Plastik durchgeführt. Im Vergleich mit einem azimutal polarisierten oder unpolarisierten Strahl, konnte mit einem radial polarisierten eine 10-fach höhere Bohrgeschwindigkeit erzielt werden [15]. Eine weitere interessante Anwendung ist zudem die Strukturierung von Oberflächen mittels Laserpulsen mit azimutaler Polarisation. So bilden sich durch die Bearbeitung Strukturen im Mikro- und Nanometerbereich aus, die zu neuen Anwendungen führen könnten [16].

Da trotz der positiven und vielversprechenden Ergebnisse im Bereich der Materialbearbeitung mit gepulsten Lasern mit axial-symmetrischer Polarisation keine Systeme mit großer Ausgangsleistung vorhanden waren, förderte die europäische Union ab 2013 das Projekt RAZIPOL [17]. Das Projekt hatte das Ziel, diese Form von Laserstrahlung bei mehreren 100 Watt Ausgangsleistung zu erzeugen, um ein effizientes, großflächiges Bearbeiten von Oberflächen und das Bohren von Löchern mit großen Aspektverhältnis zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Verstärkerkette bestehend aus einem Seedlaser, drei sogenannten "Single-Crystal Fiber" (SCF) Verstärkern und einem finalen Scheibenlaser-Multipassverstärker aufgebaut. Die radiale bzw. azimutale Polarisation wurde mittels eines Polarisationskonverters erzeugt. Bei einer korrekten Ausrichtung wandelt dieser einen einfallenden, linear polarisierten Gaußstrahl in den gewünschten CVB um. Obwohl die in RAZIPOL gezeigten Resultate beeindruckend sind, zeigte sich, dass das Seedsystem vor dem Multipassverstärker aufgrund seiner hohen Komplexität zu

einigen Problemen führen kann. So stellte sich vor allem die Stabilisierung des Seedlasers als sehr herausfordernd dar. Auch die Qualität der radialen bzw. azimutalen Polarisation genügte regelmäßig nicht den erwarteten Ergebnissen.

Aus diesem Grund war das Ziel der vorliegenden Arbeit, ein System zu entwickeln, welches alternativ als Seedquelle genutzt werden könnte. Dabei lag der Fokus auf einer Verringerung der Komplexität des Systems und einer hohen Qualität der Intensitätsverteilung und der Reinheit der radialen Polarisation des erzeugten Strahls. Letztere beeinflusst maßgeblich das Ergebnis nach dem Multipassverstärker. Um als Seedquelle für den Multipass-Verstärker sinnvoll einsetzbar zu sein, musste zudem eine Ausgangsleistung von mindestens 50 W erzielt werden.

Um das gewünschte Ziel zu erreichen wurde eine Kombination aus einem modengekoppelten Oszillatator mit radialer Polarisation und einem einzelnen, nachfolgenden SCF-Verstärker gewählt. Aufgrund der Leistungsskalierbarkeit des Konzepts wurde die Scheibenlasertechnologie für den Oszillatator gewählt. Der modengekoppelte Betrieb wurde durch den Einsatz eines sättigbaren Absorberspiegels (Semiconductor saturable absorber mirror - SESAM) erlangt. Zur Erzeugung der radialen Polarisation des Lasers wurde ein am IFSW schon länger zum Einsatz kommender Ansatz gewählt. Dieser lag in der Verwendung von dielektrischen Gitterspiegeln, die den Beugungseffekt der optischen Gitter mit einem Wellenleitereffekt in der dielektrischen Schichtstruktur des Spiegels kombinieren. In Abhängigkeit der Polarisation des einfallenden Lichts, kann durch eine geeignete Wahl der Strukturparameter des Gitters wie Periode, Tiefe und Füllfaktor und die Dicke der dielektrischen Schichten die spektrale Reflektivität des Bauteils beeinflusst werden. Bis zum Beginn der Arbeit wurden diese Bauteile in Kombination mit einem herkömmlichen Auskoppler als Endspiegel der Kavität verwendet. Aufgrund des gewünschten modengekoppelten Betriebs bei gleichzeitiger radialer Polarisation des Laserstrahls, musste der Gitterspiegel erstmals als Auskoppler fungieren. Dies war notwendig, da der sättigbare Absorberspiegel ebenfalls als Endspiegel der Kavität eingesetzt werden muss, um eine stabile Modenkopplung, zu gewährleisten. Die so, am IFSW, zum ersten Mal gleichzeitig als Auskoppler verwendete Gitter-Wellenleiterstruktur wird "Grating Waveguide Output Coupler" (GWOC) genannt. Um den gewünschten Auskopplgrad zu erzielen, mussten die Strukturparameter des Gitterspiegels angepasst werden. Zur Verstärkung des Ausgangsstrahls wurde wie eingangs erwähnt eine SCF-Verstärker gewählt. Verglichen mit den Verstärkern im RAZIPOL-Projekt wurde ein Kristall mit einer niedrigeren Dotierung verwendet, um einen negativen Einfluss der thermischen Effekte im Verstärkerkristall auf die Qualität des verstärkten Strahls zu vermeiden.

Mit dem gewählten Ansatz konnte der weltweit erste modengekoppelte Scheibenlaser mit

radialer Polarisation demonstriert werden. Bei einer maximalen Pumpleistung von 61 W lieferte das System eine Ausgangsleistung von 13.3 W. Die maximale Ausgangsleistung war durch das Auftreten von Instabilitäten des Betriebs bei höheren Pumpleistungen begrenzt. Die Pulswiederholrate des Systems betrug 42.1 MHz, was zu einer Pulswärme von 316 nJ führte. Unter der Annahme eines  $\text{sech}^2$ -förmigen Pulses wurden eine Pulsdauer von 907 fs und eine daraus resultierende Pulsspitzenleistung von 0.31 MW ermittelt. Damit erreichte das System die höchste bis zu diesem Zeitpunkt demonstrierte Ausgangsleistung und die gleichzeitig kürzeste Pulsdauer eines Oszillators mit axial-symmetrischer Polarisation. Im Bereich der Pulswärme wurden zuvor nur gütegeschaltete Systeme mit höheren Werten gezeigt. Der Strahl wies gleichzeitig eine, bei einem solchen System bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht gezeigte, nahezu ideale doughnutförmige Intensitätsverteilung auf und erreichte einen sehr guten "Degree of radial polarization" von  $97 \pm 1\%$  (gibt die Qualität bzw. Reinheit der Polarisation an). Für die Beugungsmaßzahl wurden Werte  $<2,1$  gemessen.

Für den zuvor erwähnten SCF-Verstärker wurde der Einsatz von Pumpquellen mit verschiedenen Emissionswellenlängen getestet. Die beiden verwendeten Systeme wiesen Wellenlängen von nominell 940 nm bzw. 969 nm auf. Dabei zeigte sich überraschenderweise unter Verwendung der 940 nm Diode eine höhere maximale Ausgangsleistung von 69.7 W bei einer Pumpleistung von 482 W, verglichen mit einer Ausgangsleistung von 66.3 W bei einer Pumpleistung von 519 W unter Verwendung der 969 nm Diode. Die Pulsdauern nach der Verstärkung betrugen 1030 fs und 909 fs. Der Unterschied ist auf eine Änderung der Pulsdauer und der Repetitionsrate des Seedlasers zwischen den beiden Versuchen zurückzuführen. Diese betrugen im ersten Fall 938 fs bzw. 41.5 MHz und im zweiten Fall 800 fs bzw. 40.7 MHz. Damit lagen die entsprechenden Pulswärmen nach der Verstärkung bei  $1.68 \mu\text{J}$  (940 nm) bzw.  $1.63 \mu\text{J}$  (969 nm), mit entsprechenden Pulsspitzenleistungen von 1.48 MW bzw. 1.58 MW. Während die Versuche mit der ersten Diode zu besseren Verstärkungsergebnissen führten, zeigte sich bei den Versuchen mit der zweiten Diode eine bessere Langzeitstabilität der Ausgangsleistung. Trotz weiterhin sehr guter Werte der Beugungsmaßzahl von 2.1-2.4 zeigte sich in beiden Fällen ein leichter Astigmatismus und gewisse Verformungen des Ausgangsstrahls. Durch einen Phasenverschiebung zwischen den orthogonalen Komponenten der Polarisation des Laserstrahls, hervorgerufen durch den Verstärkerkristall und ein nachfolgendes optisches Element, verfügte der Ausgangsstrahl zudem über eine sogenannte "Hybrid1"-Polarisation. Daher wurde für den Versuch mit der 969 nm Diode zusätzlich nachgewiesen, dass sich diese Polarisationsform, mittels einer Vorkompensation mit einem Halbwellenplättchen, wieder in die radiale Polarisation umwandeln lässt. Der Polarisationsgrad der Hybrid1-Polarisation betrug in den beiden Versuchen  $96.4 \pm 1\%$  bzw.  $96.1 \pm 1\%$ . Mit Hilfe des Halbwellen-

plättchens konnte im letzteren Fall zudem eine radialer Polarisationsgrad von  $94.1 \pm 1\%$  erreicht werden, ohne dabei die anderen Betriebsparameter negativ zu beeinflussen. Trotz der leichten Verschlechterung der Strahlparameter, liegen sowohl die Beugungsmaßzahl, als auch die Reinheit der Polarisation in einem sehr guten Bereich. Somit konnte das Ziel der Entwicklung eines alternativen Seedsystems mit reduzierter Komplexität und guter Strahlqualität in weiten Teilen erfüllt werden.

# 1 Introduction

During the last decades, the cylindrical vector beams (CVB) with their anisotropic axially symmetric polarization state have gained a lot of attention. Especially the  $LG_{01}^*$ <sup>1</sup> mode, with its doughnut-shaped intensity distribution, has been proven to be useful in various applications. For example, it is an interesting tool for particle trapping and the excitation of surface plasmons in rotationally symmetric structures [1]. Furthermore, it has been shown that a radially polarized  $LG_{01}^*$  can be focussed to extremely small spot sizes using optics with a high numerical aperture (NA). In case of a sufficiently large NA the focal spot size can become significantly smaller than theoretically possible with a linearly polarized beam<sup>2</sup> [6, 7]. This effect is caused by a longitudinal z-component of the electric field in the vicinity of the waist of the focussed beam. This component evolves in the center of the beam and can carry a large amount of the power of the laser. A CVB with azimuthal polarization does not exhibit this feature and keeps its doughnut shape in the proximity of the beam waist. Theoretically, this can be used for spatial focus engineering by adjusting the ratio of radial and azimuthal polarization within a beam [8]. In addition, in case of pulsed laser beams with extremely large peak powers the acceleration of particles such as electrons [2, 9], ions [10], and protons [11] becomes an interesting topic.

The beneficial properties specifically for laser material processing applications were theoretically outlined in 1999 by Niziev and Nesterov [12]. They predicted an increased cutting speed when using radially polarized laser beams instead of laser beams with a linear or circular polarization state. For some materials the hypothesis was proven to be correct in 2010 by Endo [3]. The radial polarization of a 2 kW beam of a CO<sub>2</sub> laser in continuous wave (CW) operation led to an improved cutting performance compared to results obtained with circular polarization. Depending on the processed material, either the cutting speed could be increased by up to 50 %, the cutting quality improved or less inert gas was required. Shortly afterwards, the application department at the IFSW conducted experiments with a radially polarized CW CO<sub>2</sub> laser with even larger average powers of up to 3 kW. They were able to demonstrate comparable tendencies for

---

<sup>1</sup>The abbreviation LG is supposed to indicate that the intensity distribution is similar to that of a Laguerre-Gaussian mode, even though the  $LG_{01}^*$  mode is actually a superposition of two Hermite-Gaussian modes as will be shown in Chapter 4.

<sup>2</sup>If the spot size of the beam is defined via the FWHM width of the intensity distribution.

further materials and processes [4]. For example, they showed an increase of 33 % in the allowable feed rate for welding with minimum spattering.

Already 2007 Meier et al. experimentally investigated the benefits of pulsed CVB laser beams for drilling applications using a Q-switched (QS) Nd:YAG laser that delivered nanosecond pulses [5]. Depending on the thickness of the metal sheets, they achieved 1.5 - 4 times faster drilling speeds as compared to results obtained with linear and circular polarization. Comparable results were demonstrated for the drilling of deep micro-holes in metal sheets with azimuthally (sheet thickness  $\geq 1$  mm) and radially (sheet thickness  $\leq 0.5$  mm) polarized picosecond pulses generated by an Yb:YAG laser [13]. The beneficial properties of pulsed CVBs for laser material processing are not restricted to metals. For instance, drilling micro-holes into  $\text{SiO}_2$  and pure Si substrates is most efficient when an azimuthally polarized beam is used, as was shown with a mode-locked TiSa laser in [14]. The results of an investigation regarding drilling of holes in carbon fiber reinforced plastic with a pulsed (3 Hz)  $\text{CO}_2$  laser were reported in [15]. A 10 times higher drilling speed could be achieved using azimuthal instead of radial or random polarization. Another interesting topic is the structuring of surfaces with pulsed CVBs. Their intensity and polarization distribution lead to special structures on the micro- and nanometer scale, which might be used for new applications in the future [16].

As a result of these various promising applications and results, the development and investigation of laser sources generating these special types of laser beams is an ongoing process.

# 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

### Gorri, Michael

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

### Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO<sub>2</sub>-Laserschneiden von Metallen  
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

### Rudlaff, Thomas

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

### Bork, 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 längsgestromte CO<sub>2</sub>-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 längsgestromten CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>- 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

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

- Wittig, Klaus**  
Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungs-laserstrahlung  
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5
- Grünenwald, Bernd**  
Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mit-tels CO<sub>2</sub>-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 Entwick-lungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren  
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3
- Bloehs, Wolfgang**  
Laserstrahlhärtén mit angepaßten Strahlfor-mungssystemen  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5
- Bea, Martin**  
Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3
- Stöhr, Michael**  
Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanal-gekühlten Laserdioden  
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8
- Plaß, Wilfried**  
Zerstörschwellen und Degradation von CO<sub>2</sub>-Laseroptiken  
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6
- Schaller, Markus K. R.**  
Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetall-schichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän  
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4
- Hack, Rüdiger**  
System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-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**  
Fluidodynamische und elektrophysikalisch opti-mierte Entladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9
- Volz, Robert**  
Optimierte Beschichten von Gußeisen-, Alumi-nium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern  
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2
- Bartelt-Berger, Lars**  
Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grund-mode-Diodenlasern  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0
- Müller-Hummel, Peter**  
Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvor-richtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung  
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9
- Rohde, Hansjörg**  
Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsohren mit einem Nd:YAG-Slablaser  
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7
- Huonker, Martin**  
Strahlführung in CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbei-tung  
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5
- Callies, Gert**  
Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbe-stimmenden Mechanismen beim Laserabtragen  
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3
- Schubert, Michael E.**  
Leistungsskalierbares Lasersystem aus faserge-koppelten Singlemode-Diodenlasern  
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1
- Kern, Markus**  
Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laser-strahlschweißen  
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X
- Raiber, Armin**  
Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermik-robohren 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

### **Bahnmüller, 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**

Qualitätsicherung 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 Weichlötns 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 Vertikalemittler-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 -föhrung 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 keramischen 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 Metallen mit kurz- und ultrakurz gepulsten Lasern  
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

**Guido Hergenhan**

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

**Klaus Goth**

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-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 Präzision 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

Marsangoni-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 variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen  
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 Naht-eigenschaften 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 Breitling

Gaspaseneinflüsse 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 Weerpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen  
2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

### Angelika Beyert

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

**Sven-Simon Beyert**

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

**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 Brilanz  
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 Schmelzeffluß 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