

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern

von Dr.-Ing. Christian Röhler
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., 2020

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2020

ISBN 978-3-8316-4888-7

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Liste der verwendeten Symbole	7
Kurzfassung	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	17
1.1 Motivation und Zielsetzung	17
1.2 Strahlführung von cw-Grundmodestrahlung	18
1.2.1 Alternative Faserkonzepte	20
1.2.1.1 Low-NA Fasern	20
1.2.1.2 Multikernfasern	21
1.2.1.3 Leakage-Channel Fasern	21
1.2.1.4 Multi-Trench Fasern	23
1.2.1.5 Bragg-Fasern	24
1.2.2 Forschungsbedarf	25
1.3 Strahlführung von UKP-Strahlung in Hohlkernfasern	26
1.3.1 Photonische Kristallfasern	27
1.3.1.1 Photonische Bandlücke	27
1.3.1.2 Inhibited-Coupling	28
1.3.2 Forschungsbedarf	30
2 Untersuchungen zum Grundmodestrahltransport in hochgradig multimodigen Stufenindexfasern	32
2.1 Stand der Technik	32
2.2 Einfluss des Faserkerndurchmessers auf die Modenmischung	35
2.2.1 Überblick und Zielsetzung	35
2.2.1.1 Forschungsfrage	36
2.2.2 Numerische Simulationen	37
2.2.3 Experimentelle Untersuchungen	42
2.2.3.1 Einfluss des Modenüberlapps	43

2.2.3.2	Einfluss der Faserbiegung	47
2.2.3.3	Limitierungen aufgrund stimulierter Raman-Streuung	49
2.2.4	Zusammenfassung	52
2.3	Limitierung der Faserlänge	54
2.3.1	Überblick und Zielsetzung	54
2.3.1.1	Coupled-Mode-Theorie	55
2.3.1.2	Forschungsfrage	57
2.3.2	Faserauslegung und Faserproduktion	58
2.3.2.1	Numerische Simulationen	58
2.3.2.2	Faserzug	61
2.3.2.3	Modenfeldadapter	63
2.3.2.4	Spleißverbindungen	66
2.3.3	Experimentelle Untersuchungen	67
2.3.3.1	Einfluss der Faserlänge	67
2.3.3.2	Limitierungen aufgrund stimulierter Raman-Streuung	75
2.3.4	Zusammenfassung	79
3	Untersuchungen zur Polarisationserhaltung in Hohlkernfasern	82
3.1	Stand der Technik	82
3.2	Überblick und Zielsetzung	84
3.2.1	Forschungsfrage	85
3.3	Theoretische Grundlagen	85
3.4	Numerische Simulationen	87
3.5	Experimentelle Untersuchungen	90
3.6	Zusammenfassung	98
4	Zusammenfassung und Ausblick	100
4.1	Grundmodestrahltransport in hochgradig multimodigen Stufenin- dexfasern	100
4.2	Polarisationserhaltung in Hohlkernfasern	102
	Literaturverzeichnis	104
	Danksagung	118

Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fit-Parameter aus Gl. 2.8	
A_{eff}	effektive Modenfläche	μm^2
B	Fit-Parameter aus Gl. 2.8	
$CCDR$	Verhältnis von Kern- zu Manteldurchmesser	
d_{12}	Kopplungskoeffizient zwischen den Moden LP_{01} und LP_{11}	
d_{clad}	Manteldurchmesser	μm
d_{core}	Kerndurchmesser	μm
$d_{\mu\nu}$	Kopplungskoeffizient zwischen den Moden μ und ν	
D	globaler Kopplungskoeffizient	
$DOLP$	Polarisationsgrad der linearen Polarisation	%
f	Brennweite	mm
g_k	Modenüberlapp der radialsymmetrischen LP_{0k} -Mode mit dem einfallenden Gaußstrahl	%
g_r	Ramanverstärkungskoeffizient	m/W
I_N	resultierende Intensitätsverteilung im Nahfeld	W/m ²
I_F	resultierende Intensitätsverteilung im Fernfeld	W/m ²
$I_{k,N}$	Intensitätsverteilung der radialsymmetrischen LP_{0k} -Mode im Nahfeld	W/m ²
$I_{k,F}$	Intensitätsverteilung der radialsymmetrischen LP_{0k} -Mode im Fernfeld	W/m ²
$I_{\mu,N}$	Intensitätsverteilung der Mode μ im Nahfeld	W/m ²
$I_{\mu,F}$	Intensitätsverteilung der Mode μ im Fernfeld	W/m ²
k	Ordnung radialsymmetrischer LP_{0k} -Moden	
L	Faserlänge	m
L_b	Schwebungslänge	m
L_{eff}	effektive Faserlänge	m
m_{all}	Anzahl aller Moden	
m_{rad}	Anzahl der radialsymmetrischen LP_{0k} -Moden	
M	Müller-Matrix	

Symbol	Bedeutung	Einheit
M^2	Beugungsmaßzahl	
M_{nom}^2	Nominelle Beugungsmaßzahl	
n	Brechungsindex	
n_{core}	Brechungsindex des Faserkerns	
n_{eff}	Propagationskonstante	
$n_{\text{eff},\mu}$	Propagationskonstante der Mode μ	
N	Anzahl Spleißparameter	
NA	Numerische Apertur	
p	Erweiterung Gl. 1.1 unter Berücksichtigung des Polarisationszustands	
P_{μ}	Leistung der Mode μ	W
P_{ν}	Leistung der Mode ν	W
P_{SRS}	Schwelleistung von stimulierter Raman-Streuung	W
PER	Polarisations-Extinktionsverhältnis	dB
r_{bend}	Biegeradius	cm
S_0	Stokes-Parameter: Intensität	
S_1	Stokes-Parameter: linear polarisiert (horizontal/vertikal)	
S_2	Stokes-Parameter: linear polarisiert ($\pm 45^\circ$)	
S_3	Stokes-Parameter: zirkular polarisiert (links-/rechtsdrehend)	
\vec{S}	originärer Stokes-Vektor	
\vec{S}'	resultierender Stokes-Vektor	
V	V-Zahl	
w_0	Strahlradius auf der Faserendfläche	μm
z	Propagationslänge	m
z_{b}	Kopplungslänge	mm
α	Dämpfung	dB/km
α_k	Propagationsverluste der radialsymmetrischen LP_{0k} -Mode	dB/km
α_{μ}	Propagationsverluste der Mode μ	m^{-1}
δ	Phasenverschiebung	$^\circ$
δn_{eff}	Effektiver Brechzahlunterschied zwischen beiden orthogonal zueinander polarisierten LP_{01} -Moden	
Δn_{eff}	Effektiver Brechzahlunterschied zwischen den Moden LP_{01} und LP_{11}	

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\Delta n_{\text{eff},\mu\nu}$	Effektiver Brechzahlunterschied zwischen den Moden μ und ν	
θ	Winkel der schnellen Achse	°
λ	Vakuum-Wellenlänge	nm
χ	Azimuth-Winkel	°
ψ	Winkel der Elliptizität	°
ω	Raumfrequenz	mm ⁻¹

Abkürzung	Bedeutung
ASE	engl.: Amplified Spontaneous Emission (verstärkte spontane Emission)
<i>CCDR</i>	engl.: Core to Cladding Diameter Ratio (Verhältnis von Kern- zu Manteldurchmesser)
CW	engl.: Continuous Wave (Dauerstrich)
<i>DOLP</i>	engl.: Degree of Linear Polarization (Polarisationsgrad der linearen Polarisation)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	engl.: Fast Fourier Transform (schnelle Fourier-Transformation)
FWHM	engl.: Full Width at Half Maximum (Halbwertsbreite)
HC	engl.: Hollow-Core (Hohlkern)
HOM	engl.: Higher-Order Mode (Mode höherer Ordnung)
IC	engl.: Inhibited-Coupling (unterdrückte Kopplung)
IFSW	Institut für Strahlwerkzeuge
LCF	engl.: Leakage Channel Fiber (Faser mit Verlustkanal)
MCVD	engl.: Modified Chemical Vapor Deposition (modifizierte chemische Gasphasenabscheidung)
<i>NA</i>	Numerische Apertur
PBG	engl.: Photonic Bandgap (photonische Bandlücke)
PBS	engl.: Polarizing Beamsplitter (polarisierender Strahlteiler)
PCF	engl.: Photonic Crystal Fiber (photonische Kristallfaser)
<i>PER</i>	engl.: Polarization Extinction Ratio (Polarisations-Extinktionsverhältnis)
PML	engl.: Perfectly Matched Layer (perfekt absorbierende Schicht)
SRS	Stimulierte Raman-Streuung
UKP	Ultrakurzpuls

Kurzfassung

Festkörperlaser mit beugungsbegrenzter Strahlqualität eröffnen durch ihre stetig steigende Ausgangsleistung kontinuierlich neue Anwendungsfelder in der Lasermaterialbearbeitung. In Hinblick auf den wachsenden Bedarf einer flexiblen Strahlführung von Festkörperlaserstrahlung gewinnen optische Glasfasern hierbei, bedingt durch ihre vergleichsweise niedrigen Kosten, hohe Zuverlässigkeit und Vielseitigkeit, in industriellen Systemen immer mehr an Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher verschiedene optische Glasfasern für Anwendungen im Dauerstrichbetrieb (CW), wie auch für ultrakurz gepulste (UKP) Strahlung, untersucht.

Für Anwendungen von cw-Lasern bis in den kW-Bereich wurde der Grundmodestrahltrahtransport in hochgradig multimodigen Stufenindexfasern untersucht. Hierfür wurde die gesamte Entwicklungskette von der Faserauslegung über die Faserproduktion bis hin zur Fasercharakterisierung durchgeführt.

Im Bereich der Hohlkernfasern, wie sie typischerweise für die Übertragung von UKP-Strahlung verwendet werden, wurden Fasern bezüglich ihres polarisationserhaltenden Verhaltens analysiert, da die Polarisation einen entscheidenden Parameter für eine Vielzahl der Prozesse in der Mikromaterialbearbeitung darstellt.

Zum Grundmodestrahltrahtransport in hochgradig multimodigen Stufenindexfasern wurde zu Beginn der Einfluss des Faserkerndurchmessers untersucht, um den minimal benötigten effektiven Brechzahlunterschied Δn_{eff} zwischen den Moden LP_{01} und LP_{11} , der zur Unterdrückung von Modenmischung notwendig ist, zu finden. Hierbei wurde gezeigt, dass es möglich ist, in Fasern mit Kerndurchmessern von bis zu $80\ \mu\text{m}$ bei einer numerischen Apertur (NA) von 0,111 über eine Faserlänge zwischen 5 und 10 m eine nahezu beugungsbegrenzte Strahlqualität (Beugungsmaßzahl $M^2 \approx 1,3$) beizubehalten. Dies entspricht beim größten Faserkerndurchmesser von $80\ \mu\text{m}$ einer effektiven Modenfläche von $2800\ \mu\text{m}^2$ bei einem Δn_{eff} von $0,5 \cdot 10^{-4}$. Der Einfluss der Einkopplung wurde zuerst theoretisch mit Hilfe numerischer Simulationen untersucht, bevor die Ergebnisse experimentell bestätigt wurden, indem die Strahlgröße des fokussierten Gaußstrahls auf der Faserfacette variiert wurde. Bei optimaler Einkopplung in die Faser, das heißt, der Überlapp zwischen einfallendem Strahl und LP_{01} -Grundmode der Faser ist maximal, konnte nach der

Faser die niedrigste Beugungsmaßzahl gemessen werden. Außerdem wurde gezeigt, dass die Strahlqualität nach der Faser selbst für Biegeradien der Faser bis hinab zu 2 cm kaum degradiert und so für alle untersuchten Fasern mit Kerndurchmessern zwischen 50 und 80 μm stets ein M^2 kleiner 1,5 gemessen werden konnte. Die Schwellleistung von stimulierter Raman-Streuung konnte experimentell für eine Faser mit einem Kerndurchmesser von 80 μm bei einer Länge von 10 m, welche lose auf dem Tisch platziert wurde (Biegeradius $r_{\text{bend}} \geq 25 \text{ cm}$), zu mehr als 60 kW ermittelt werden.

Um Limitierungen aufgrund thermisch induzierter Aberrationen zu umgehen, wie sie typischerweise bei transmissiven Optiken zur Freistrahleinkopplung auftreten, wurde zur weiteren Untersuchung des Grundmodestrahltransports in hochgradig multimodigen Stufenindexfasern ein monolithischer Ansatz verwendet. Zur experimentellen Realisierung wurde ein cw-Grundmode-Faserlaser an die zu untersuchenden Transportfasern gespleißt, welche auf Basis der *Coupled-Mode*-Theorie hinsichtlich Faserdesign wie auch Faserproduktion optimiert wurden. Die hierfür notwendigen *Taper* wurden direkt während des Faserzugs in die Fasern implementiert und alle benötigten Spleißverbindungen wurden vorab entwickelt. Über eine Faserlänge von 100 m konnte auf diese Weise für Fasern mit Kerndurchmessern zwischen 30 und 60 μm bei einer NA von 0,22 die Erhaltung nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität ($M^2 \approx 1,3$) demonstriert werden. Mit steigender Faserlänge wurde eine graduelle Degradierung der Strahlqualität unabhängig vom Faserkerndurchmesser beobachtet. Für eine Faser mit einem Kerndurchmesser von 60 μm bei einer Länge von 380 m konnte trotzdem noch ein M^2 von 2,1 gezeigt werden. Die Hochleistungstauglichkeit des verwendeten monolithischen Ansatzes konnte demonstriert werden, indem ein Strahl mit einer Leistung von 1 kW über eine 100 m lange Faser mit einem Kerndurchmesser von 60 μm übertragen werden konnte, bei einem M^2 des transmittierten Strahls von 1,3 und ohne dass stimulierte Raman-Streuung die Übertragung limitierte.

Zur Übertragung von UKP-Strahlung wurden zwei verschiedene Typen von Hohlkernfasern bezüglich ihres polarisationserhaltenden Verhaltens untersucht. Die verwendeten photonischen Kristallfasern nutzen „*Inhibited-Coupling*“ als Strahlführungsmechanismus, wobei die K-7C Faser ein Kagome-Gitter im Fasermantel besitzt, bei der sieben Fehlstellen den Faserkern mit hypozykloider Kernkontur bilden, und die T-8 Faser über einen tubularen Aufbau verfügt, bestehend aus acht Kapillaren im Fasermantel. Es konnte gezeigt werden, dass ein Unterschied der Propagationskonstanten beider orthogonal zueinander polarisierten LP_{01} -Fasermoden ($\delta n_{\text{eff}} \neq 0$) über die Propagation zu einer Phasenverschiebung führt. Dies kann umgangen

werden, wenn lediglich eine der beiden LP_{01} -Moden der Faser angeregt wird, indem die Orientierung der linearen Polarisation der in die Faser eingekoppelten Strahlung entweder parallel oder orthogonal zur Biegeebene ausgerichtet ist. Wird hingegen eine Mischung beider Polarisationszustände angeregt, führt dies über die Propagation zu einer Degradierung des linearen Polarisationszustands. Für beide Fasern steigt mit abnehmendem Biegeradius die Differenz beider Propagationskonstanten δn_{eff} an, wodurch die Phasenverschiebung zunimmt. Dieses Verhalten wurde theoretisch anhand numerischer Simulationen beschrieben und konnte abschließend mittels experimenteller Ergebnisse bestätigt werden. Es hat sich hierbei gezeigt, dass die Phasenverschiebung in der K-7C Faser etwa einen Faktor 5 höher ist als in der T-8 Faser, was in guter Übereinstimmung mit den numerischen Simulationen steht.

Extended Abstract

The steady increase of the output power of solid-state lasers which emit a diffraction-limited beam offers a variety of new application areas for laser materials processing. In view of the growing demand for flexible beam delivery systems optical fibers became increasingly important for industrial systems because of their comparatively low costs, high reliability, and versatility. Therefore, several optical fibers for applications with cw (continuous wave) as well as ultrafast lasers were investigated.

Fundamental-mode beam transport in highly multimode fibers was analyzed for applications of cw-lasers with kW-class output power. The whole chain of the development including design, production as well as characterization of the fibers was considered for this purpose.

Furthermore, hollow-core fibers as typically used for the delivery of beams from ultrafast lasers were investigated regarding their polarization-maintaining behavior, since it is known that the polarization can be a crucial parameter for micro materials processing.

The influence of the core diameter of highly multimode step-index fibers was investigated to determine the limit of the effective refractive index difference Δn_{eff} between the modes LP_{01} and LP_{11} which is required to suppress mode mixing. It could be shown that it is possible to maintain a nearly diffraction-limited beam quality (beam quality factor $M^2 \approx 1.3$) in 5 to 10 m long fibers with core diameters of up to 80 μm (numerical aperture $NA = 0.111$). At the maximum core diameter of 80 μm this corresponds to a Δn_{eff} of $0.5 \cdot 10^{-4}$ and an effective mode field area of 2800 μm^2 . The influence of the launching conditions of the beam into the fibers was theoretically evaluated using numerical simulations and verified experimentally by varying the size of the input beam on the fiber facet. Optimum launching is achieved when the overlap between the incident beam and the fundamental LP_{01} -mode of the fiber is maximum. In this case, the lowest beam quality factor after the propagation through the fiber could be measured. Additionally, it could be shown that fiber bends down to radii as small as 2 cm barely degrade the beam quality of the transmitted beam ($M^2 < 1.5$) for all investigated fibers with core diameters in the range between 50 and 80 μm . The threshold power of stimulated Raman

scattering could be measured to be more than 60 kW for a fiber with a core diameter of 80 μm and a length of 10 m which had been loosely placed on the table (bending radius $r_{\text{bend}} \geq 25$ cm).

To avoid the limitations of thermally induced aberrations, which are typically observed in transmissive free-space launching optics, a monolithic setup was used for further analysis of the fundamental-mode beam transport in highly multimode fibers. To this end, a cw fundamental-mode fiber laser was spliced onto the investigated delivery fibers which were optimized using the coupled-mode theory in terms of fiber design and fiber production. The needed fiber tapers were directly implemented during fiber drawing and all required splices were developed beforehand. For fibers with a length of 100 m and with core diameters ranging between 30 and 60 μm ($NA = 0.22$) a nearly diffraction-limited beam quality ($M^2 \approx 1.3$) could be maintained. With increasing fiber length, a gradual degradation of the beam quality independent of the core diameter was observed, but still an M^2 of 2.1 could be measured for a fiber with a core diameter of 60 μm and a length of 380 m. The high-power suitability of the monolithic approach was demonstrated by transmitting 1 kW of power through a 100 m long fiber with a core diameter of 60 μm without the onset of stimulated Raman scattering while still maintaining a nearly diffraction-limited beam quality ($M^2 \approx 1.3$).

Furthermore, with regard to the delivery of ultrafast laser beams, two different kinds of inhibited-coupling guiding hollow-core photonic crystal fibers were analyzed regarding their polarization maintaining behavior – a hypocycloid-shaped 7-cell fiber with a Kagome lattice (K-7C) and a fiber with a single-ring tubular lattice consisting of eight capillaries (T-8). It was shown that a mismatch of the propagation constants of both orthogonally polarized LP_{01} -modes ($\delta n_{\text{eff}} \neq 0$) leads to a phase shift. To circumvent this, it was found that only one of the LP_{01} -modes should be excited by orienting the linear polarization of the injected beam either parallel or perpendicular to the plane of bending. If a mixture of both modes is excited, this will lead to a degradation of the polarization state during propagation. For both kinds of fiber the difference between the propagation constants δn_{eff} of the orthogonally polarized LP_{01} -modes, and hence the induced phase shift, increases with diminishing bending radius. This effect was predicted theoretically and was corroborated using numerical simulations and experimental results. It was shown that the induced phase shift in the K-7C fiber is about 5 times higher as compared to the T-8 fiber which is in good agreement with the numerical simulations.

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 Laserмикробohren 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

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

Christian Föhl

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

Andreas Josef Birnesser

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

Christoph Neugebauer

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

Andreas Dauner

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

Axel Heß

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

Christian Gehrke

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

David Schindhelm

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

Tilman Froschmeier-Hans

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

Fluidynamische 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 Heißrisen 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