

## Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen

Bearbeitet von  
Andreas Popp

1. Auflage 2017. Taschenbuch. 242 S. Paperback

ISBN 978 3 8316 4643 2

Format (B x L): 14,5 x 20,5 cm

Gewicht: 306 g

Weitere Fachgebiete > Technik > Technik Allgemein > Technische Optik,  
Lasertechnologie

schnell und portofrei erhältlich bei

The logo for beck-shop.de features the text 'beck-shop.de' in a bold, red, sans-serif font. Above the 'i' in 'shop' are three red dots of increasing size. Below the main text, the words 'DIE FACHBUCHHANDLUNG' are written in a smaller, red, all-caps, sans-serif font.

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# **Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen**

von Dr.-Ing. Andreas Popp  
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. habil. Hartmut Bartelt

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 978-3-8316-4643-2

Printed in Germany

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

# Kurzfassung

Eine stetig steigende Ausgangsleistung bei gleichzeitig besserer Strahlqualität eröffnet dem Festkörperlaser, im Besonderen dem Scheiben- und Faserlaser, immer mehr Anwendungsfelder. Dadurch wurden diese Laserarten zu den bedeutendsten Festkörperlaser in der Materialbearbeitung. Eingesetzt werden sie in konventionellen Anwendungen wie Laserstrahlschneiden und -schweißen, aber auch in neuen Applikationen, wie Remote-Dampfdruck-Abtragschneiden.

Inhalt der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von Ytterbium-dotierten Faserlasern und Faserverstärkern die als Strahlkonverter bzw. Brillanzkonverter eingesetzt werden, um die Laserstrahlung von Scheibenlasern zu Strahlung mit einer höheren Brillanz zu konvertiert. Diese faserbasierten Laser eignen sich besser dazu, eine hohe Strahlqualität zu erzielen, da die Strahlqualität des Scheibenlasers nach dem gegenwärtigen Stand der Technik bei hohen Ausgangsleistungen durch eine thermisch induzierte Phasenfrontstörung verringert wird. Des Weiteren gibt es auch heute noch keine Lösung, den Strahl eines Grundmode-Scheibenlasers im kW-Bereich, wie er bereits vereinzelt demonstriert wurde, zuverlässig in Fasern einzukoppeln. Um diese Begrenzungen des Scheibenlasers bezüglich der Strahlqualität zu überwinden, werden in dieser Arbeit zwei Konzepte zur Steigerung der Brillanz untersucht: zum einen ein Diodenlaser-gepumpter Faserverstärker zur Verstärkung der Grundmode-Strahlung eines Scheibenlaser-Oszillators und zum anderen ein Multimode-Scheibenlaser, der als Pump laser für einen Faserlaser eingesetzt wird, um so eine höhere Strahlqualität zu erzielen.

Im ersten Ansatz wird die Ausgangsleistung des Scheibenlaser-Oszillators in einer aktiven Faser verstärkt, die mit einem Diodenlaser bei einer Wellenlänge von 976 nm gepumpt wird. Hierbei führt die im Vergleich zu den üblichen Wellenlängen von Faserlasern kürzere und damit näher bei der Pumpwellenlänge des Verstärkers liegende Emissionswellenlänge des Scheibenlasers von 1030 nm zu einer hohen Stokes-Effizienz von 95 %. Damit wird beim Verstärkungsprozess nur wenig Wärme in der aktiven Faser freigesetzt. Da die Ausgangsleistung durch die Zersetzungstemperatur des Acrylat-Schutzmantels begrenzt ist, wird so eine Leistungsskalierung des Faserverstärkers ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts besteht in der Unempfindlichkeit des Scheibenlasers gegenüber Reflexionen; dadurch kann zwischen Seed-Laser und Verstärker auf Isolatoren verzichtet werden. Diese Unempfindlichkeit ist eine Folge des vergleichsweise niedrigen Auskopplungsgrads von Scheibenlasern, wodurch vom Verstärker reflektierte Strahlung

kaum in den Resonator einkoppelt.

Mit diesem Ansatz wurde erstmalig bei einer Seed-Laserleistung von 30 W eine linear polarisierte Ausgangsleistung von 440 W demonstriert. Dabei wurde eine sehr gute Strahlqualität von  $M^2 \approx 2$  erzielt. Als Verstärker kam eine polarisationserhaltende Faser mit einer Länge von 7 m zum Einsatz. In einem weiteren Experiment wurde die linear polarisierte Strahlung des Seed-Lasers mit einer nicht-polarisationserhaltenden Faser verstärkt. Die Motivation für diese Untersuchung liegt darin, dass konventionelle, nicht-polarisationserhaltende Stufenindex-Fasern im Allgemeinen leistungsbegrenzender sind und große Kerndurchmesser ( $> 20 \mu\text{m}$ ) nicht mehr polarisationserhaltend ausgeführt werden können. Für die Leistungsskalierung des Grundmode-Scheibenlasers sind jedoch große Kerndurchmesser wichtig, um eine hohe Schwellleistung für die stimulierte Brillouin-Streuung (SBS) und die stimulierte Raman-Streuung (SRS) sicherzustellen und damit hohe Leistungsskalierungspotenziale zu erschließen. Damit beim Aufbau des Faserverstärkers mit einer nicht-polarisationserhaltenden Faser die Polarisation der verstärkten Strahlung trotzdem erhalten bleibt, muss die Faser druck- und zugspannungsfrei gelagert werden, sodass in ihr keine Doppelbrechung verursacht wird. Um dies zu erleichtern, wurde für die experimentelle Untersuchung eine Faser mit besonders hoher Pumpabsorption gewählt, bei der eine Länge von nur 1,1 m für eine effiziente Verstärkung ausreicht.

Mit einem solchen Verstärker konnte erstmals gezeigt werden, dass trotz der nicht-polarisationserhaltenden Faser die Polarisation der verstärkten Strahlung bis zu einer Ausgangsleistung von 129 W beibehalten wurde. Bei höheren Leistungen war die Polarisationserhaltung wegen des mit der Ausgangsleistung zunehmenden thermischen Einflusses begrenzt. Insgesamt erreichte der Verstärker eine maximale Ausgangsleistung von 285 W. Dies entspricht einer extrahierten Leistung von 260 W/m und einer Verstärkung des Seed-Lasers um 12,6 dB.

Im zweiten weiter oben genannten Ansatz wird die Brillanz der erzeugten Strahlung erhöht, indem die Strahlung des Scheibenlasers zur Anregung eines Faserlasers eingesetzt wird. Gegenüber konventionell schmalbandigen Diodenlaser-gepumpten Faserlasern steht damit auch eine signifikant höhere Pumpleistung in vergleichsweise hoher Strahlqualität zur Verfügung. Darüber hinaus führt die gegenüber der Wellenlänge der üblicherweise eingesetzten Pumpdioden verhältnismäßig lange Emissionswellenlänge des Scheibenlasers im damit gepumpten Faserlaser zu einer höheren Stokes-Effizienz von 94 %. Im Vergleich zum Diodenlaser-gepumpten Faserlaser werden in der aktiven Faser dadurch 30 % weniger Wärme frei. Da auch hier die Zersetzungstemperatur des Acrylat-Schutzmantels der Faser die Leistungsskalierung begrenzt, ermöglicht der geringere Wärmeeintrag eine Leistungsskalierung in den Multi-kW-Bereich bei beugungsbegrenzter Strahlqualität.

Für die experimentelle Umsetzung des Scheibenlaser-gepumpten Faserlasers standen zwei verschiedene Ytterbium-dotierte Fasern zur Verfügung, die sich für das Pumpen bei einer Wellenlänge von 1030 nm eignen. Die erste Faser (IPHT 30/100/400) hatte einen relativ

großen Kerndurchmesser von 30  $\mu\text{m}$ , wodurch mit gleichzeitig hoher Dotierkonzentration eine hohe Pumpabsorption erzielt wurde. Dies ermöglicht bei einem effizienten Laserbetrieb zu kurzen Faserlängen und damit zu hohen Schwellleistungen für SRS und SBS. Des Weiteren wirken auf die Laserstrahlung geringe absolute Hintergrundverluste. Damit war die Faser optimal für das Erreichen einer hohen Ausgangsleistung geeignet. In den Experimenten mit der IPHT-Faser wurden unterschiedliche Faserführungen mit zunehmender Kühlung der dotierten Faser erprobt. Mit dem in dieser Arbeit am weitesten entwickelten spiralförmigen Laseraufbau wurde eine maximale Ausgangsleistung von 1,1 kW bei einer maximalen optisch-optischen Effizienz von 85 % erzielt. Damit konnte erstmalig die Leistungsfähigkeit dieses Scheibenlaser-gepumpten Faserlasers gezeigt werden. Dieser Laser erreichte eine Strahlqualität von  $M^2 = 3,3$ . Somit wurde die Strahlqualität des Scheibenlasers von  $M^2 = 15$  mit nur geringen Verlusten deutlich gesteigert.

Als zweite Faser für die Experimente stand eine dotierte Faser (Liekki Yb1300-25/105/300 DC) mit einem im Vergleich zur IPHT-Faser kleineren Kerndurchmesser von 25  $\mu\text{m}$  zur Verfügung. Diese Faser erzielte in Voruntersuchungen eine deutlich geringere Pumpabsorption, jedoch eine höhere Strahlqualität. Um die Strahlqualität des Faserlasers weiter zu verbessern, erfolgte der Resonatoraufbau nicht durch diskrete Spiegel im Freistrah, sondern faserintern durch *Fiber Bragg Gratings* (FBGs). Diese im Faserkern eingeschriebenen Bragg-Gitter wirken begünstigend auf den geführten Grundmode im Laser. Dadurch wurde eine Grundmode-Ausgangsleistung von 350 W erreicht.

Mit dem Auftreten des in Fasern bis dato wenig bekannten Effekts der Mode-Instabilität verminderte sich abrupt die Strahlqualität, und ein signifikanter Teil der Leistung wurde in den Mantel ausgekoppelt. Die Mode-Instabilität wird unterstützt durch transversal räumliches Lochbrennen, das in *Large-Mode-Area Fiber* (LMA)-Fasern auftritt, in denen die Laserstrahlung im Grundmode propagiert. Um Faserlaser zu entwickeln, bei denen der Effekt minimiert werden kann, werden neue Faserkonzepte benötigt, wo die Modeführung und die Ytterbium-Dotierung teilweise räumlich voneinander getrennt sind (engl. *confined doping*). Auf dieser Basis könnte zukünftig ein Multi-kW-Grundmode-Betrieb realisiert werden, der den Weg zu vielen neuen Anwendungen eröffnet.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	9
Liste der verwendeten Symbole	13
Abkürzungsverzeichnis	17
Extended Abstract	19
<b>1 Einleitung</b>	<b>25</b>
1.1 Hochleistungslaser in der Materialbearbeitung . . . . .	25
1.2 Motivation und Konzeptvergleich . . . . .	30
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit . . . . .	32
<b>2 Grundlagen zu Faserlasern und Faserlaserverstärkern</b>	<b>35</b>
2.1 Strahlenoptische Beschreibung der Strahlführung in einer Glasfaser . . . . .	35
2.2 Wellenoptische Beschreibung der Strahlausbreitung in einer Stufenindex-Faser . . . . .	38
2.2.1 Generelle Unterscheidung von Stufenindex-Fasern . . . . .	44
2.3 Faserverstärker und Faserlaser . . . . .	46
2.3.1 Prinzipieller Aufbau . . . . .	46
2.3.2 Absorption der Pumpleistung in dotierten Glasfasern . . . . .	47
2.3.3 Modale und temperaturabhängige Verstärkungssättigung . . . . .	52
2.4 Modendiskriminierung durch Biegung . . . . .	55
2.5 Führung von polarisierter Laserstrahlung in Glasfasern . . . . .	59
2.6 Aufbau des Faserlaserresonators . . . . .	63
2.6.1 Die <i>Butt-Coupling</i> -Technik . . . . .	63
2.6.2 Faserintegrierte Bragg-Gitter . . . . .	64
2.7 Transversales räumliches Lochbrennen und Mode-Instabilität in LMA-Fasern	68
<b>3 Das laseraktive Material Yb:Glas</b>	<b>73</b>
3.1 Das Energieniveauschema von Yb:Glas . . . . .	74
3.1.1 Niveau-Systeme in Yb-Glas . . . . .	75

3.2	Messung der Fluoreszenzlebensdauer . . . . .	78
3.3	Bestimmung der temperaturabhängigen effektiven Wirkungsquerschnitte . . . . .	82
3.4	Temperaturabhängige Transparenzeigenschaften . . . . .	88
3.5	Temperaturabhängige Lasereffizienz . . . . .	94
3.6	Photodarkening in Ytterbium-dotierten Fasern . . . . .	98
3.6.1	Messaufbau zur Bestimmung von Photodarkening in Glasfasern . . . . .	103
3.7	Neutronenstreuung an Ytterbium-dotierten Gläsern . . . . .	109
3.7.1	Magnetisierbarkeit von $\text{Yb}^{3+}$ in Glas . . . . .	110
3.7.2	Das Experiment MIRA an der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz . . . . .	112
3.7.3	Ergebnisse aus der Messung der Neutronenstreuung . . . . .	114
<b>4</b>	<b>Grenzen der Leistungsskalierbarkeit</b>	<b>121</b>
4.1	Thermische Grenzen . . . . .	121
4.1.1	Wärmestrahlung . . . . .	122
4.1.2	Konvektion mit einem Luftstrom . . . . .	123
4.1.3	Wärmeleitung . . . . .	124
4.2	Rayleigh-Streuung und nichtlineare Streuung . . . . .	127
4.2.1	Rayleigh-Streuung . . . . .	128
4.2.2	Stimulierte Brillouin-Streuung (SBS) . . . . .	128
4.2.3	Stimulierte Raman-Streuung (SRS) . . . . .	133
4.3	Fazit zu den thermischen und durch nichtlineare Effekte hervorgerufenen Begrenzungen . . . . .	139
<b>5</b>	<b>Linear polarisierter Scheibenlaser-Oszillator mit Faserlaserverstärker</b>	<b>141</b>
5.1	Der Scheibenlaser als Seed-Laser . . . . .	141
5.2	Diodenlaser zum Pumpen des Faserverstärkers . . . . .	144
5.3	Faserlaserverstärker mit polarisationserhaltender Faser . . . . .	145
5.3.1	Ergebnisse der Simulation des Faserverstärkers mit polarisationser- haltender Faser . . . . .	148
5.3.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	150
5.4	Faserlaserverstärker mit nicht-polarisationserhaltender Faser . . . . .	156
5.4.1	Ergebnisse der Simulation des Faserverstärkers mit nicht-polarisationserhaltender Faser . . . . .	160
5.4.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	161
5.4.3	Fazit aus den experimentellen Untersuchungen Faserverstärker für linear polarisierte Seedlaser . . . . .	167
<b>6</b>	<b>Scheibenlaser-gepumpter Faserlaser</b>	<b>169</b>
6.1	Faserlaser mit einfachem und doppeltem Pumpdurchgang . . . . .	169

6.2	Der als Pumplaser verwendete Scheibenlaser . . . . .	173
6.3	Aktive Fasern mit hoher Pumpabsorption . . . . .	174
6.3.1	Die aktive Faser IPHT 30/100/400 . . . . .	174
6.3.2	Die aktive Faser Liekki Yb1300-25/105/300 DC . . . . .	178
6.3.3	Vergleich der beiden aktiven Fasern . . . . .	180
6.4	Ergebnisse der Simulation des Scheibenlaser-gepumpten Faserlasers . . . . .	181
6.4.1	Ergebnisse der Simulation für die Faser IPHT 30/100/400 . . . . .	182
6.4.2	Ergebnisse der Simulation für die Faser Liekki Yb1300-25/105/300 DC184	
6.4.3	Vergleich der berechneten Ergebnisse . . . . .	186
6.5	Experimentelle Untersuchung der Scheibenlaser-gepumpten Faserlaser . . . . .	189
6.5.1	Experimentelle Untersuchung des unidirektionalen Aufbaus . . . . .	189
6.5.2	Experimentelle Untersuchung des bidirektionalen Aufbaus mit der Faser IPHT 30/100/400 . . . . .	196
6.5.3	Endgepumpter Faserlaser mit fasernintegrierten Bragg-Gittern . . . . .	205
6.5.4	Scheibenlaser-gepumpter Faserlaser mit FBG . . . . .	207
6.5.5	Fazit aus den experimentellen Untersuchungen der Scheibenlaser- gepumpten Faserlaser . . . . .	212

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>217</b>
-----------------------------	------------

<b>Danksagung</b>	<b>231</b>
-------------------	------------

# 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 Laserstrahltiefschweißen 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 Nahteig-enschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

### Mikhail Larionov

Kontakterung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

### Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

### Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

### Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

### Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

### Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

### Detlef Breiting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

### Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

### Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

### Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

**Christian Stolzenburg**

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich  
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

**Svent-Simon Beyertt**

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern  
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

**Sonja Kittel**

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen  
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

**Andrey Andreev**

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebekonstruktion – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte  
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

**Christian Föhl**

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

**Andreas Josef Birnesser**

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

**Christoph Neugebauer**

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

**Andreas Dauner**

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

**Axel Heß**

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

**Christian Gehrke**

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

**David Schindhelm**

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

**Moritz Vogel**

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

**Andreas Michalowski**

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

**Georg Stöppler**

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

**Patrick Mucha**

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

**Claus-Dieter Reiniger**

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

**Andreas Leitz**

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

**Peter Stritt**

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

**Katrin Sarah Wentsch**

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

**Jan-Philipp Negel**

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

**Christian Freitag**

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

**Andreas Popp**

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