



Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge



## LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Michael Eckerle

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

utzverlag





Michael Eckerle

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

utzverlag · München 2019

Laser in der Materialbearbeitung  
Band 96

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7508-1 Version: 1 vom 22.10.2019  
Copyright© utzverlag 2019

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4804-7  
Copyright© utzverlag 2019

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>



# List of Symbols

Symbol	Meaning	SI-Units
<b>Latin Letters</b>		
$A$	Constant; Entry in the cavity round trip matrix	
$AOI$	Angle of incidence	°
$A_{RAH}$	Magnitude of an Extended Jones state	
$D$	Entry in the cavity round trip matrix	
$DOAP$	Degree of azimuthal polarization	%
$DOH1P$	Degree of hybrid1 polarization	%
$DOH2P$	Degree of hybrid2 polarization	%
$DORP$	Degree of radial polarization	%
$E$	Electric field	V/m
$\hat{E}$	Normalized measured electric field vector	
$\hat{E}_{azi}$	Normalized electric field vector of an ideal azimuthally polarized beam	
$\hat{E}_{h1}$	Normalized electric field vector of an ideal hybrid1 polarized beam	
$\hat{E}_{h2}$	Normalized electric field vector of an ideal hybrid2 polarized beam	
$\hat{E}_{rad}$	Normalized electric field vector of an ideal radially polarized beam	
$E_{1,RAH}$	Electric field of a CVB with a radial polarization	V/m
$E_{2,RAH}$	Electric field of a CVB with an azimuthal polarization	V/m
$E_{3,RAH}$	Electric field of a CVB with a hybrid1 polarization	V/m
$E_{4,RAH}$	Electric field of a CVB with a hybrid2 polarization	V/m
$E_{im}$	Electric field of a Hermite-Gaussian mode	V/m
$E_p$	Pulse energy	J
$E_{pl}$	Electric field of a Laguerre-Gaussian mode	V/m
$f_{rep}$	Repetition rate of a pulse laser	1/s
$F_p$	Pulse fluence	J/m <sup>2</sup>
$F_{pD}$	Pulse fluence of a doughnut-shaped beam	J/m <sup>2</sup>