



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge

IFSW

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Christian Röhler

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern



utzverlag



Christian Röhrer

**Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit
optischen Fasern**

utzverlag · München 2021

Laser in der Materialbearbeitung
Band 101

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7631-6 Version: 1 vom 25.02.2021
Copyright© utzverlag 2021

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4888-7
Copyright© utzverlag 2020

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern

Von der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Christian Röhler

aus Spaichingen

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth

Tag der mündlichen Prüfung: 07. Oktober 2020

Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart

2020

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

Christian Röhler
Flexible Führung hochbrillanter Laser-
strahlen mit optischen Fasern

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.

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}	