

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des  IFSW

Andreas Popp

**Faserlaser und Faserlaserverstärker als
Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen**

Herbert Utz Verlag 

Andreas Popp

**Faserlaser und Faserlaserverstärker als
Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen**

Herbert Utz Verlag · München 2017

Laser in der Materialbearbeitung
Band 85

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7305-6 Version: 1 vom 13.04.2017
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4643-2
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

A. Popp
Faserlaser und Faserlaserverstärker
als Brillanzkonverter für Scheiben-
laserstrahlen

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.

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

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 Festkörperlasern 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 Pumplaser 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 der 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 leistungsbeständiger 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 eigneten. 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 $1,1\ \text{kW}$ 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 $350\ \text{W}$ 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
1 Einleitung	25
1.1 Hochleistungslaser in der Materialbearbeitung	25
1.2 Motivation und Konzeptvergleich	30
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	32
2 Grundlagen zu Faserlasern und Faserlaserverstärkern	35
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
3 Das laseraktive Material Yb:Glas	73
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 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
4	Grenzen der Leistungskalierbarkeit	121
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
5	Linear polarisierter Scheibenlaser-Oszillator mit Faserlaserverstärker	141
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
6	Scheibenlaser-gepumpter Faserlaser	169
6.1	Faserlaser mit einfachem und doppeltem Pumpdurchgang	169

6.2	Der als Pump laser verwendete Scheiben laser	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 Scheiben laser-gepumpten Faser lasers	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	182
6.4.3	Vergleich der berechneten Ergebnisse	186
6.5	Experimentelle Untersuchung der Scheiben laser-gepumpten Faser laser	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 Faser laser mit faseringegrierten Bragg-Gittern	205
6.5.4	Scheiben laser-gepumpter Faser laser mit FBG	207
6.5.5	Fazit aus den experimentellen Untersuchungen der Scheiben laser-gepumpten Faser laser	212
	Literaturverzeichnis	217
	Danksagung	231

Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Einheit	Erklärung
A_{eff}	m^2	Effektive Modenquerschnittsfläche
A_{Kern}	m^2	Querschnittsfläche des Faserkerns
A_{Mantel}	m^2	Querschnittsfläche des Fasermantels
A_e	–	Amplitude des elektrischen Felds
a	m	Kernradius
B	$\text{W}/(\text{cm}^2 \text{ sr})$	Brillanz
ΔB	–	Modale Doppelbrechung
B	T	Betrag der magnetischen Flussdichte
C_{Kern}	–	Amplitudenkoeffizient im Faserkern
C_{Mantel}	–	Amplitudenkoeffizient im Mantel
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
c_{sp}	$\text{J}/(\text{kg K})$	Spezifische Wärmekapazität
D	m	Lochblendendurchmesser
d	m	Probenlänge
E_k	J	k -tes Energieniveau
ΔE	J	Energiedifferenz
G	–	Verstärkungsfaktor
g	$1/\text{m}$	Verstärkungskoeffizient
g_0	$1/\text{m}$	Kleinsignal-Verstärkungskoeffizient
G_{max}	–	Maximaler Verstärkungsfaktor
G_{R}	–	Raman-Verstärkungsfaktor
g_{dirac}	–	Gyromagnetischer Faktor
g_{eff}	$1/\text{m}$	Effektiver Kleinsignal-Verstärkungskoeffizient
g_{R}	$1/\text{m}$	Raman-Verstärkungskoeffizient
g_{B}	$1/\text{m}$	Brillouin-Verstärkungskoeffizient
g_{SBSmax}	$1/\text{m}$	Maximaler SBS-Verstärkungskoeffizient
H	A/m	Betrag der magnetische Feldstärke
h	J s	Planck'sches Wirkungsquantum
I	W/m^2	Intensität
I_1	W/m^2	Intensität der einfallenden Laserstrahlung
I_{LP}	W/m^2	Intensitätsverteilung des LP-Modes

I_{\min}	W/m ²	Transparenzintensität
I_{psat}	W/m ²	Sättigungsintensität des Pumplasers
I_{p}	W/m ²	Pumpintensität
I_{sat}	W/m ²	Sättigungsintensität
I_{Yb}	–	Anteil angeregter Ionen
\mathbf{J}	–	Gesamtdrehimpulsvektor
J_l	–	Bessel-Funktion erster Gattung l -ter Ordnung
k_{B}	J/K	Boltzmann-Konstante
K_l	–	Bessel-Funktion zweiter Gattung l -ter Ordnung
\mathbf{L}	–	Gesamtbahndrehimpulsvektor
L	m	Gesamtlänge
L_{B}	m	Schwebungslänge
L_{eff}	m	Effektive Faserlänge
l	m	Mittlere freie Weglänge
M	–	Multiplizität
M^2	–	Beugungsmaßzahl
M_J	–	Orientierungsquantenzahl
N	1/m ³	Ionenkonzentration
N_{g}	1/cm ³	Dotierkonzentration
N_i	–	Besetzungszahl des i -ten Niveaus
N_{o}	–	Besetzungszahl des oberen Laserniveaus
N_{u}	–	Besetzungszahl des Grundniveaus
N_2^{max}	–	Maximale Inversion
n	–	Brechungsindex
Δn	–	Brechungsindexdifferenz
n_{eff}	–	Effektiver Brechungsindex
δn_{eff}	–	Effektive mittlere Brechzahländerung
n_{Kern}	–	Brechungsindex im Faserkern
n_{Mantel}	–	Brechungsindex im Fasermantel
P	W	Leistung
P_{abs}	W	Absorbierte Leistung
P_{Laser}	W	Laserleistung
P_{Mantel}	W	Leistung im Mantel geführt
P_{p}	W	Pumpleistung
P_{sat}	W	Sättigungspumpleistung
P_{SBS}	W	SBS-Schwelleistung
P_{SRS}	W	SRS-Schwelleistung
p	A m ²	Magnetisches Moment
ΔQ	J	Wärmeenergie

q	1/m	Ortskoordinate im reziproken Raum
R_{Rayleigh}	dB/(km μm^4)	Rayleigh-Streukoeffizient
R_{res}	–	Resonatorrückkopplung
r	m	Radius
r_{B}	m	Biegeradius
r_{Kern}	m	Kernradius
r_{Mantel}	m	Mantelradius
\mathbf{S}	–	Gesamtspindrehimpulsvektor
s	–	Spin
T	–	Transmissionsspektrum
T_{res}	–	Resonatorverluste
U	T/m V/m	Komponente des magnetischen bzw. elektrischen Felds
V	–	Normierte Frequenz
v_{a}	km/s	Schallgeschwindigkeit in Quarzglas
W_{p}	1/s	Pumprate
w	1/s	Geschwindigkeitskonstante
\dot{W}	W/m ³	Leistungsdichte
Z_{o}	–	Zustandssumme des oberen Multipletts
Z_{u}	–	Zustandssumme des unteren Multipletts
α	1/m	Absorptionskoeffizient
α_{g}	–	Gewichtungsfaktor
α_{Kern}	1/m	Absorptionskoeffizient Faserkern
α_1	dB/m	Dämpfungskoeffizient der einfallenden Laserstrahlung
α_{Mantel}	1/m	Absorptionskoeffizient Fasermantel
α_{k}	W/(m K)	Wärmeübergangskoeffizient
α_{Rayleigh}	dB/km	Rayleigh-Dämpfungskoeffizient
β	1/m	Propagationskonstante
β_{I}	–	Inversion
β_{min}	–	Transparenzinversion
δ	1/s	Abweichung der Kreiswellenzahl
η_{Stokes}	–	Stokes-Effizienz
v	–	Kontrast des Brechungsindex
Φ	–	Azimutale Funktion
Φ_{ges}	W	Gesamtstrahlungsfluss
Φ_{kon}	W	Wärmefluss durch Konvektion
ϕ	rad	Azimutalwinkel
Γ	–	Einschließungsfaktor

τ_{Ph}	s	Phononenlebensdauer
Γ_{p}	–	Überlappintegral der Pumpintensität mit dem Faserkern
Γ_{s}	–	Überlappintegral der Laserintensität mit dem Faserkern
γ	rad	Winkel
η	1/m	Biegeverlustkoeffizient
κ	–	AC-Koppelkoeffizient
A	m	Brechzahlperiodizität
λ	m	Wellenlänge
λ_{B}	m	Bragg-Wellenlänge
λ_{l}	m	Laserwellenlänge
λ_{max}	m	Wellenlänge bei maximaler Reflexion
λ_{p}	m	Pumpwellenlänge
λ_{w}	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
ν_{B}	Hz	Brillouin-Verschiebung
$\Delta\nu_{\text{B}}$	Hz	Breite der Brillouin-Verstärkung
ν_{s}	Hz	Laserfrequenz
Ω	sr	Raumwinkel
ϖ	m	Modenfelddurchmesser
Ω_{B}	Hz	Differenzenfrequenz
Π	–	Linear polarisierter Leistungsanteil
\mathfrak{R}	–	Reflektivität
$\mathfrak{R}_{\text{max}}$	–	Maximale Reflektivität
ρ	–	Normierte Radialkoordinate
ρ_{Quarz}	kg/m ³	Dichte von Quarzglas
ζ^2	m ²	Strahlvarianz
σ	m ²	Effektiver Wirkungsquerschnitt
$\hat{\sigma}$	–	DC-Koppelkoeffizient
σ_{abs}	m ²	Effektiver Wirkungsquerschnitt der Absorption
σ_{em}	m ²	Effektiver Wirkungsquerschnitt der Emission
ϑ	K	Temperatur
τ	s	Lebensdauer
τ_{rad}	s	Fluoreszenzlebensdauer

Abkürzungsverzeichnis

ASE	Verstärkte spontane Emission (engl. <i>Amplified Spontaneous Emission</i>)
DOLP	Polarisationsgrad der linearen Polarisation (engl. <i>Degree of Linear Polarization</i>)
DOP	Polarisationsgrad (engl. <i>Degree of Polarization</i>)
FBG	Faser-Bragg-Gitter (engl. <i>Fiber Bragg Grating</i>)
HR	Hochreflektierend
LED	Leuchtdiode (engl. <i>Light-emitting Diode</i>)
LLK	Lichtleitkabel
LMA	Fasern mit großer Modenfläche (engl. <i>Large-Mode-Area Fiber</i>)
LP-Moden	Linear polarisierte Moden
MM	Mehrmodig (engl. <i>Multimode</i>)
N.A.	Numerische Apertur
NBOH	Nicht-brückenbildender Sauerstoff (engl. <i>Non-bridging Oxygen Holes</i>)
OC	Auskopplung (engl. <i>Output Coupler</i>)
ODC	Sauerstoffverarmungszentrum (engl. <i>Oxygen Deficiency Center</i>)

PD	Lichtinduzierte Verluste (engl. <i>Photodarkening</i>)
PM	Polarisationserhaltend (engl. <i>Polarization-maintaining</i>)
SBS	Stimulierte Brillouin-Streuung
SM	Einmodig (engl. <i>Singlemode</i>)
SPP	Strahlparameterprodukt
SRS	Stimulierte Raman-Streuung
TEM	Transversal elektromagnetische Moden
TSHB	Transversal räumliches Lochbrennen (engl. <i>Transverse Spatial-Hole Burning</i>)

Extended Abstract

The generation of high-power (kW-class), near-diffraction-limited laser beams using the combination of thin-disk and fiber laser is reported in the present thesis. Today the thin-disk and the fiber laser are widely recognized to be the most advanced and well established high-power solid-state laser concepts with a substantial market share for materials processing as well as for other applications. Thin-disk lasers can deliver very high output powers in the multi-kW range with a comparably good beam quality ($15 < M^2 < 30$). However, for diffraction-limited laser beams, this laser concept has so far been limited to sub-kW output powers of approximately 800 W if the diffraction-limited quality was maintained over the complete power range of the laser [1] and to 4 kW for a single defined working point [2]. The beam quality is generally limited due to thermally induced wave front distortions. Additionally for multi-kW single-mode laser beams generated outside of a fiber, no fiber delivery is possibly without very high losses. This is a strong disadvantage for many industrial applications which require the flexibility of the fiber.

The present thesis describes the investigation and development of two new concepts to overcome the brightness limitations of the thin-disk lasers by combining the disk laser with an active fiber. In the first concept a low-power single-mode thin-disk seed laser is amplified by a diode-pumped fiber amplifier. In the second concept the multi-kW output beam of an Yb:YAG thin-disk laser is coupled into a fiber with a core diameter of 100 microns and a N.A.= 0.1 and used as a high-brightness pump source for a Yb:glass fiber laser. In this latter concept, the fiber laser acts as a brilliance converter and improves the beam quality considerably with low conversion losses.

In the beginning of the thesis more theoretical investigations are presented which were required for the experimental testing. To be able to realize an efficient fiber laser and amplifier, detailed simulations were performed. For these simulations the fluorescence lifetime and the effective cross-sections of the active material were needed as input for the modeling. In the present studies, the investigated Yb:glass was doped using the direct nano-particle deposition technology. The fluorescence lifetime and the temperature-dependent effective cross-sections of this active material were studied and are reported here for the first time. Using the Fourier transform spectroscopy (FTIR), the temperature-dependent effective absorption cross-sections were measured within a temperature range from 20 °C to 170 °C. The effective emission cross-sections were determined from the absorption cross-sections using the McCumber formalism. Moreover, the fluorescence

lifetime of the Yb:glass with a doping level of $8.5 \times 10^{25}/\text{m}^3$ was measured to be 960 μs . The thus determined effective gain cross-sections were then applied to calculate the transparent inversion (bleaching threshold) of the used active material. The transparent inversion was found to be 1.2% at a laser wavelength of 1070 nm and reduced to 0.4% at 1100 nm, where the longer emission wavelength is obtained by pumping a fiber laser with a thin-disk laser and also exhibits a higher Stokes efficiency. A complete simulation of the fiber laser was performed by taking into account the temperature-dependence of the pump absorption derived from the temperature-dependent effective cross-sections of the ytterbium doped glass. The simulation showed that the output power of diode-pumped fiber laser at a wavelength of 976 nm with a emission wavelength of 1070 nm decreases by about 5% within a temperature ranging from 20 °C to 170 °C. In contrast, the thin-disk pumped fiber laser reaches 11% higher output power at higher temperatures, which results from a more populated pump-level. The pump-level is in this case not the ground state thus, at higher temperatures the absorption is increased. As a result, the fiber length of thin-disk pumped lasers can be shortened for an efficient operation, with a corresponding benefit of reduced background losses.

When operated at a high inversion, Ytterbium-doped fiber lasers based on standard aluminosilicate host glass exhibit a reduction of the output power over time due to the so-called photodarkening effect. Photodarkening strongly depends on the technology used to manufacture the fiber, the chemical composition of the host glass matrix, the degree of inversion, and the laser wavelength. The photodarkening behavior of two different fibers, the Liekki Yb1300-25/105/300 DC and the IPHT 30/100/400 fiber, were investigated and are discussed in this thesis. In an accelerated aging experiment at an inversion level of 70%, the output power of a conventionally fabricated Liekki fiber suffered from an attenuation of the laser beam of 25 dB/m for wavelengths longer than 900 nm. On the other hand, the accelerated aging experiment of the cerium co-doped IPHT fiber showed no photodarkening-induced degradation. Pumping at longer wavelengths is also known to reduce photodarkening in aluminosilicate ytterbium-doped fibers because the photodarkening rate strongly depends on the inversion. Due to its long pump wavelength, the inversion of a typical thin-disk pumped fiber oscillator is low (max. 6%) in contrast to a conventional diode-pumped laser (max. 12%). Therefore, no special effort for co-doping to suppress photodarkening is required for disk-laser pumped fiber lasers.

Until now, the photodarkening effect has not been fully understood, yet it appears that the formation of Yb^{3+} -clusters within the glass is the principal cause for this effect. Neutron scattering was used for the first time as reported in this thesis to experimentally investigate cluster formation in Yb-doped glasses. Compared to the conventionally used transmission electron microscopy (TEM) [3], the sample is not affected and the whole cylindrical glass sample (15 mm diameter and 35 mm length) can be analyzed at once. The results have shown that the size of the ytterbium-clusters has to be smaller than 3.5 nm in diameter.

This localization of the cluster size will be beneficial for future investigations with other methods based on neutron scattering.

The results from the characterization of Yb:glass are used in the second part of the thesis to realize the main objective, namely to generate high brightness laser beams based on thin-disk lasers in combination with fiber based concepts. For this purpose the power scaling limits of this fiber based concepts were investigated. One scaling limit in high-power fiber lasers results from the need to limit the operation temperature due to the decomposition temperature (85 °C) of the fiber coating. The heat is generated during pumping in the fiber core and will be conducted to the fiber surface. Therefore, various setups providing efficient cooling were investigated in order to enable high pump and output powers. The evaluation showed that both convection and the thermal radiation from the surface of the fiber have a minor effect. The dominant heat transport mechanism is the thermal conduction out of the fiber into the surrounding heat sink. Simulations showed that, when the fiber is in a perfect contact with the heat sink, at a pump power of 5000 W the temperature rise can be 20 K at the surface of the fiber cladding. Additionally the simulation results indicated that increasing the fiber cladding diameter is also beneficial for the heat transport out of the lasing medium because of the increased surface, which enables a higher heat transport.

The onset of nonlinear optical effects such as stimulated Raman scattering (SRS) and stimulated Brillouin scattering (SBS) constitute another limitation for power scaling. Calculations of these effects were performed in order to verify the limits of the laser concepts which were investigated in the thesis. As a result, the most critical non-linear effect in the considered laser architectures is SRS. In contrast to SBS, the SRS does not depend on the spectral emission properties of the laser; it rather depends on the intensity distribution along the fiber. Two laser configurations (bidirectional and unidirectional) were considered. It was shown that for a fiber with a core diameter of 25 μm and at a pump power of 5 kW, the maximum fiber length to avoid SRS is 12 m for the unidirectional setup and 16 m for the bidirectional setup. The SRS threshold thus limits the fiber length and consequently leads to a higher heat load per unit length of the fiber at a given power. Further scaling of the output power requires better heat removal, lower fractional heating, and / or suppression of SRS by other means.

With the aim to generate polarized radiation, a fiber amplifier was developed to increasing the power of the linearly polarized output beam from a medium-power single-mode thin-disk laser. In this case, the thin-disk laser was used as a seed source for the fiber-based amplifier. As the low output-coupling makes the thin-disk laser insensitive to back reflections, this approach has the additional advantage that no additional isolator is needed. Another advantage of the thin-disk laser is its emission wavelength of 1030 nm, at which the amplifier reaches a high Stokes-efficiency of 95 % when pumped at a wavelength of 976 nm. An intra-cavity Brewster plate was used to polarize the seed laser and its degree

of linear polarization (DOLP) was measured to be 99%. The fiber amplifier consisted of an ytterbium-doped polarization-maintaining (PM) fiber (Liekki Yb1200-20/400 DC-PM). With this setup, a total linearly polarized output power of 440 W with a beam quality of $M^2 = 2$ was achieved, corresponding to a gain of 11,4 dB for the 30 W output from the thin-disk seed laser.

A conventional active step index fiber (non-PM) was utilized in the amplifier instead of the PM fiber for further investigation of the polarization behavior in a 1.1 m long fiber (Liekki Yb1200-30/250 DC). In general non-PM fibers are able to handle higher laser power because of lower intrinsic losses and strain and with a core diameter of 30 μm the amplifier offered a higher potential for power scaling with regard to SRS and SBS. The active fiber was mounted in a customized holder to minimize the compressive and the tensile stresses on the fiber (to avoid polarization scrambling). The amplifier was seeded with the same thin-disk laser described in the previous section and delivered up to 129 W of linearly polarized (DOLP of 99%) output power. The DOLP reduced to 55% at higher output powers due to depolarization effects in the fiber. The maximum output power achieved with this fiber was 285 W with a beam quality of $M^2 = 3$. The beam quality was decreased by the transverse spatial-hole burning effect. The thin-disk seed laser with an output power of 15 W was amplified by a factor of 12.4 dB. This result corresponds to an extracted laser power of 260 W/m from the 1.1 m long fiber, which is the highest reported output from a conventional step index fiber with acrylate coating.

The last part of this thesis is devoted to investigations on the combination of the thin-disk and the fiber laser for the generation of high brilliance. This tandem-pumping concept, which consists of an ytterbium-doped fiber laser pumped by a Yb:YAG thin-disk laser at a wavelength of 1030 nm, offers a convenient way to scale the output power of fiber lasers to the multi-kilowatt level and offers a variety of benefits for applications. One of the main benefits is the flexibility of the laser source concerning the beam quality. For some applications (e.g. welding) the thin-disk laser can be used directly and for applications demanding higher brightness (e.g. remote cutting) the fiber laser acts as a brilliance converter. As previously noted, high-power, high-brilliance flexible beam delivery with optical fibers over longer distances is typically limited by the onset of nonlinear effects such as SRS and SBS. A pumping concept which effectively circumvents these limitations is remote pumping, where the pump beam is guided over long distances in a fiber delivery cable and the compact high-power single-mode fiber laser is placed close to the workpiece. The multi-mode fiber-coupled pump source can thus be placed far away from the cavity and the pump radiation is transported over long distances without SRS-related constraints.

The most common approach for the pumping of high-power fiber lasers is diode laser pumping, either directly, using fiber-coupled diodes spliced to the fiber laser, or remotely with fiber-coupled diode lasers using comparatively long transport fibers. One of the

ultimate limits for scaling the output power of these direct diode-pumped lasers is the accessible Stokes-shift which results in a high heat load per unit length. Therefore, an obvious approach to reduce the fractional heating is to increase the pump wavelength. In fact, a thin-disk pumped fiber laser exhibits a 30% lower heat load as compared to a conventional diode-pumped fiber laser due to the higher Stokes-efficiency. Pumping at long wavelengths however implicates a strongly reduced pump absorption. To compensate this reduction much higher pump brilliance is required, which cannot be provided by today's commercially-available pump diode lasers.

The thin-disk laser-pumped fiber laser employing a bidirectional pumping configuration (with a double pass for both the pump and the laser radiation) generated a maximum output power of 1008 W with only 1264 W of pump power. The active fiber (IPHT 30/100/300) was mounted on a water-cooled cylinder. Despite the low pump absorption at a wavelength of 1030 nm, this kW-fiber laser reached a maximal optical efficiency of 85%. The fiber laser operating as a brilliance converter reached a beam quality of $M^2 = 2.5$ pumped with a laser beam out of a fiber coupled thin-disk laser with a $M^2 = 15$. To further improve the cooling, the fiber was mounted on an water-cooled spiral holder in a second step. With this compact and robust setup, the laser achieved a maximum output power of 1.1 kW with 80% of optical efficiency.

The investigation was pursued with another fiber (Liekki Yb1300-25/105/300 DC) optimized to reach a diffraction-limited beam quality. This fiber had a reduced core diameter of 25 μm which results in less guided modes. The resonator of the laser was realized with fiber Bragg gratings (FBGs). The FBGs exhibit a mode-selective reflectivity and thereby favors the fundamental mode. This fiber laser was mounted on a double spiral and reached an output power of 350 W with a near-diffraction limited beam quality of $M^2 = 1.4$. At higher output powers, a mode instability occurs, which leads to high gain for modes with a higher transversal order to the detriment of the fundamental mode.

In summary, fiber based concepts acting as beam converters to overcome the brightness limitations of the thin-disk laser are presented. The results show that a high-output power with a good beam quality and a very high efficiency is achievable. According to the above assessment, by utilizing improved cooling as well as an optimized fiber, it turned out the possibility for the thin-disk pumped fiber laser concept to achieve a high beam quality with an output power of about 13 kW (85% efficiency) in conjunction with a commercially available 16 kW thin-disk laser as the pump source.