

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

G. Stöppler  
Untersuchung eines OPOs im mittleren  
Infrarot im Hinblick auf Anwendungen  
für minimalinvasive Chirurgie

# **Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie**

von Dr.-Ing. Georg Stöppler  
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. Alois Herkommer

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., 2014

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 2015

ISBN 978-3-8316-4437-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung der Arbeit</b>	<b>13</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>19</b>
1.1 Motivation . . . . .	19
1.2 Gliederung der Arbeit . . . . .	24
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>27</b>
2.1 Festkörperlaser . . . . .	27
2.1.1 Thulium <sup>3+</sup> -Laser . . . . .	28
2.1.2 Holmium <sup>3+</sup> -Laser . . . . .	30
2.2 Nichtlineare Wellenlängenkonversion . . . . .	33
2.2.1 Der optisch parametrische Oszillator . . . . .	33
2.2.2 Phasenanpassung . . . . .	36
2.2.3 Resonatordesign für OPOs . . . . .	43
<b>3 OPOs im mittleren Infrarot</b>	<b>49</b>
3.1 CSP-OPO zur direkten Frequenzkonversion, von Strahlung bei $\lambda = 1 \mu\text{m}$	49
3.1.1 Aufbau des Experiments . . . . .	50
3.1.2 Konversionsresultate mit CSP . . . . .	53
3.1.3 Fazit zur direkten Frequenzkonversion mit einem CSP-OPO . . .	55
3.2 ZGP-OPO zur indirekten Frequenzkonversion mit Tandem-OPO bei $\lambda =$	
$2 \mu\text{m}$ . . . . .	56
3.2.1 Aufbau des Experiments . . . . .	57
3.2.2 Resultate des indirekt gepumpten ZGP-RISTRA-OPOs . . . . .	60
3.2.2.1 Nicht kollineare Wellenlängenabstimmung . . . . .	64
3.2.3 Fazit zur indirekten Frequenzkonversion mit einem ZGP-OPO . .	65

3.3	ZGP-OPO zur direkten Frequenzkonversion, gepumpt bei $\lambda = 2 \mu\text{m}$ . . .	67
3.3.1	Aufbau des Experiments . . . . .	68
3.3.2	Resultate des direkt gepumpten ZGP-RISTRA-OPOs . . . . .	70
3.3.2.1	Gaußförmiges Pumpprofil . . . . .	70
3.3.2.2	Top-Hat Pumpprofil . . . . .	73
3.3.2.3	Einfluss der nicht kollinearen Phasenanpassung . . . . .	76
3.3.2.4	Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Strahlung des OPOs . . . . .	77
3.3.3	Fazit zum direkt bei $\lambda = 2 \mu\text{m}$ gepumpten ZGP-OPO . . . . .	80
3.4	OP-GaAs-OPO zur direkten Frequenzkonversion, gepumpt bei $\lambda = 2 \mu\text{m}$	81
3.4.1	Aufbau von Pumplaser und OPO . . . . .	81
3.4.2	Ergebnisse und Auswertung . . . . .	84
3.4.3	Skalierung der Pulsenergie des $\text{Tm}^{3+}$ :YAG-Lasers . . . . .	87
3.4.4	Fazit zur direkten Frequenzkonversion mit einem OP-GaAs-OPO	90
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>93</b>
<b>A</b>	<b>Kristalldaten</b>	<b>99</b>
A.1	Cadmium-Silizium-Phosphid ( $\text{CdSiP}_2$ , CSP) . . . . .	99
A.2	Zink-Germanium-Phosphid ( $\text{ZnGeP}_2$ , ZGP) . . . . .	101
A.3	Gallium-Arsenid (GaAs) . . . . .	102
<b>B</b>	<b>Realisierung der RISTRA-Kavität</b>	<b>103</b>
<b>C</b>	<b>Nicht kollineare Phasenanpassung</b>	<b>105</b>
<b>D</b>	<b>Alternative Pumpquelle für <math>\text{Ho}^{3+}</math>-dotierte Lasermedien</b>	<b>107</b>
D.1	Überblick der Scheibenlaser bei $\lambda \approx 2 \mu\text{m}$ . . . . .	108
D.2	Scheibenlasermaterial aus Fluorid . . . . .	109
D.3	Ergebnisse mit $\text{Tm}^{3+}$ :LLF . . . . .	111
D.3.1	Auswahl der Laserlinie mit einem Etalon . . . . .	117
D.4	Fazit zum neuen Scheibenlasermaterial $\text{Tm}^{3+}$ :LLF . . . . .	119
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>121</b>

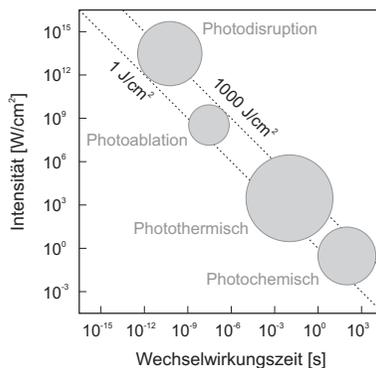
# 1 Einleitung

Bereits ein Jahr nach der ersten erfolgreichen Laser-Demonstration durch MAIMAN im Jahr 1960 wurde der erste medizinische Eingriff mittels eines Lasers an einem Netzhauttumor vorgenommen [16, 17]. Seitdem konnten mit Hilfe von Lasern viele neue und effiziente Behandlungsmethoden in der Medizin entwickelt werden, wobei die unterschiedlichsten Lasertypen und Wellenlängen im kontinuierlichen wie im gepulsten Betrieb zum Einsatz kommen [18, 19].

## 1.1 Motivation

Die Prozesse der Wechselwirkung von Laserstrahlung mit organischem Gewebe sind abhängig von Laserintensität und Wechselwirkungsdauer und werden für therapeutische Laseranwendungen in folgende Gruppen eingeteilt [20]:

- Photochemie
- Photothermik
- Photoablation
- Photodisruption

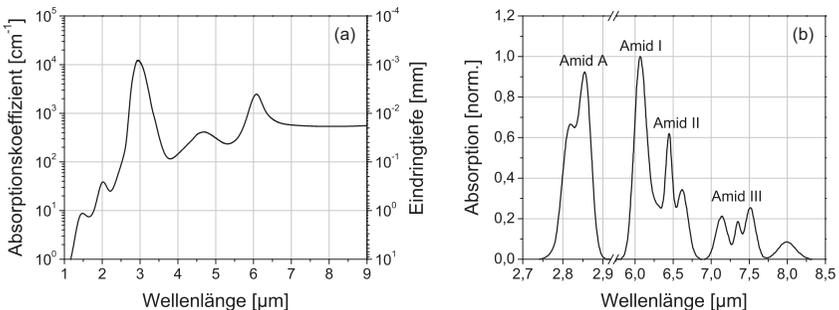


**Bild 1.1:** Intensitäten und Wechselwirkungszeiten für therapeutische Laseranwendungen [20].

Die Übersicht in Bild 1.1 zeigt, dass diese Laseranwendungen einen sehr breiten Bereich von Intensität und Wechselwirkungsdauer abdecken. Allerdings liegen die therapeutisch sinnvollen Anwendungen in einem schmalen Band, bei dem das Produkt von Intensität und Wechselwirkungszeit, d.h. die deponierte Energie pro Fläche, einen Bereich von  $1 \text{ J/cm}^2$  bis  $1000 \text{ J/cm}^2$  abdeckt [20].

Bei niedriger Intensität und langer Wechselwirkungszeit sollen körpereigene photochemische Prozesse zur besseren Therapie stimuliert werden. Ab einer Intensität von ca.  $100 \text{ W/cm}^2$  wird das Gewebe photothermisch verändert, welches zu einer Denaturierung der Proteine führt [20]. Infolge dieser irreversiblen Strukturänderung koaguliert das betreffende organische Gewebe. Dieser Prozess wird in vielen medizinischen Bereichen zur Schrumpfung von Gewebe oder zur Blutstillung eingesetzt. Bei hohen Intensitäten von über  $10^6 \text{ W/cm}^2$  kommt es zur Photoablation, bei der schlagartig ein kleines Gewebvolumen erhitzt und verdampft wird. Durch die kurze Wechselwirkungsdauer im ns-Bereich wird kaum Wärme in das umgebende Gewebe eingetragen. Ab einer Intensität von mehr als  $10^9 \text{ W/cm}^2$  wird eine sogenannte Photodisruption erzeugt. Dabei entsteht ein laserinduziertes Plasma, welches Stoßwellen generiert, die das Gewebe schädigen.

Das menschliche Gewebe besteht, je nach Alter und Geschlecht, zu ungefähr zwei Dritteln aus Wasser. Die Absorption der Laserstrahlung wird daher überwiegend durch die Wasserabsorption bestimmt. In Bild 1.2(a) ist der Verlauf des Absorptionskoeffizienten und der mittleren Eindringtiefe in Wasser als Funktion der Wellenlänge aufgetragen. Das Absorptionsmaximum von Wasser liegt bei einer Wellenlänge von  $2,9 \mu\text{m}$ . Daher werden oft Erbium-dotierte Laser eingesetzt, welche Strahlung bei dieser Wellenlänge erzeugen können. Jedoch werden kommerziell erhältliche Erbium-Laser mit Blitzlam-



**Bild 1.2:** Absorptionsspektrum (a) von Wasser [21] und (b) von Peptid [6].

pen gepumpt, sodass die Emissionsdauern typischerweise in einem Bereich von mehreren 10  $\mu\text{s}$  bis zu einigen 100  $\mu\text{s}$  liegen. Durch die lange Wechselwirkungsdauer wird im angrenzenden Gewebe eine starke Koagulation erzeugt. Bei einigen chirurgischen Eingriffen ist dieser blutungsstillende Effekt hilfreich [1]. In der Gehirn- oder Neurochirurgie sollten solche kollaterale Gewebeschädigungen allerdings so gering wie möglich ausfallen [3].

Neben Wasser bestehen Gehirn- und Nervenzellen zu einem hohen Anteil aus Proteinen [22], die aus einer Verknüpfung von vielen Aminosäuren aufgebaut sind [23]. Die einzelnen Aminosäuren sind mittels Amid-Bindungen miteinander verbunden, welche häufig auch als Peptid-Bindungen bezeichnet werden [24]. Das Absorptionsspektrum der Amid-Bindungen im infraroten Spektralbereich ist in Bild 1.2(b) dargestellt. Die höchste Absorption zeigen die Amid I und die Amid A Vibrationsbanden, die der Streck-schwingung der C=O bzw. der N-H Bindung zugeordnet werden [6, 7]. Ihre Lage bei  $\lambda = 6,1 \mu\text{m}$  bzw.  $\lambda = 2,85 \mu\text{m}$  fallen jedoch mit den Hauptabsorptionsbanden des Wassers zusammen. Die Amid II Vibration (Biegeschwingung der N-H Bindung und Streck-schwingung der C-N und C-C Bindung [6, 7]) bei der Wellenlänge von  $6,45 \mu\text{m}$  liegt deutlich neben der Absorptionsspitze von Wasser bei  $\lambda = 6,1 \mu\text{m}$ . Ausgehend von den betrachteten Zusammenhängen erhofft man sich dadurch eine selektive Absorption in Gehirn- und Nervengewebe bei einer Wellenlänge von  $6,45 \mu\text{m}$  [8, 9].

Die ersten Ablationsversuche an Gewebe mit einer Wellenlänge von  $6,45 \mu\text{m}$  wurden mit einem Freie-Elektronen Laser (FEL) im Jahr 1994 durchgeführt [8]. Dieser FEL erzeugte bei einer Repetitionsrate von 2,85 GHz Pulsenergien bis  $6 \mu\text{J}$  bei einer Pulsdauer von wenigen Pikosekunden. Dadurch ließ sich eine Intensität von über  $10^9 \text{ W/cm}^2$  erreichen, wobei die Energiedichte eines einzelnen Pulses jedoch zu gering ist, um Gewebe zu ablatieren. Durch die Addition von über zehntausend ps-Pulsen zu einem Makropuls wurde eine Pulsenergie von mehreren 10 mJ erreicht. Die Makropulsdauer konnte maximal  $6 \mu\text{s}$  betragen, bei einer Repetitionsrate von bis zu 30 Hz. Mit dieser Laserquelle wurden die ersten Operationen an Gehirntumoren durchgeführt und vielversprechende Ergebnisse erzielt [5]. Die Notwendigkeit eines Elektronenbeschleunigers und der damit verbundenen großen Dimensionen und Kosten machen aber eine flexible Verwendung eines FEL unmöglich.

Aus diesem Grund wurden bereits im Jahr 2007 erste Ansätze untersucht, die Laserstrahlung bei einer Wellenlänge von  $6,45 \mu\text{m}$  mit deutlich kleineren und günstigeren Lasersystemen zu erzeugen [13]. Dabei wurde unter Zuhilfenahme eines vierstufigen Konversionsprozesses eine Pulsenergie von 2 mJ bei einer Pulsdauer von ca. 5 ns erreicht. Die geringe Gesamteffizienz dieses Konzepts von  $\eta_{opt} = 0,019 \%$  und die nied-

rige Repetitionsrate von nur 0,5 Hz erlaubten allerdings keine effiziente chirurgische Anwendung. Ein anderes Konzept verwendete einen gütegeschalteten  $\text{Er}^{3+}$ :YAG-Laser bei einer Wellenlänge von 2,94  $\mu\text{m}$  und einer Pulsdauer von 100 ns [12]. Durch einen nichtlinearen Konversionsprozess wurde mit einer Repetitionsrate von 5 Hz eine Pulsenergie von 250  $\mu\text{J}$  mit Wellenlängen von 6,1  $\mu\text{m}$  bis 6,73  $\mu\text{m}$  erzeugt.

Um diese Arbeiten voranzutreiben, unterstützte die Europäische Kommission in einem Förderprogramm (Mid-Infrared Solid-State Laser Systems for Minimally Invasive Surgery, MIRSURG) die Entwicklung einer Strahlungsquelle in dem bevorzugten Wellenlängenbereich bei 6  $\mu\text{m}$ . Es war erforderlich einen kompakten und kostengünstigen Festkörperlaser zu entwickeln, welcher unter anderem folgende Merkmale aufweisen sollte:

- Wellenlängenbereich: 6  $\mu\text{m}$  - 6,5  $\mu\text{m}$
- Durchschnittsleistung: 1 W
- Repetitionsrate: 100 Hz - 200 Hz
- Pulsdauer: < 100 ns

Mit den bekannten Festkörperlasern können die gewünschten Wellenlängen nicht direkt aus einem elektronischen Laserübergang und mit Pulsenergien im mJ-Bereich erzeugt werden. Die Erklärung hierfür liegt primär in der maximalen Phononenenergie des Wirtsmaterials des aktiven Lasermediums [25]. Bei einem zu geringen Abstand der Energieniveaus zueinander wird die Übergangsrate der nicht strahlenden Relaxation, die in Gitterschwingungen übergeht, vorherrschend. Ist dies der Fall, findet zwischen diesen Energieniveaus kein strahlender Übergang mehr statt. Die spezifische maximale Phononenenergie eines Wirtsmaterials ergibt sich aus dessen maximaler Gitterschwingungsfrequenz. Aufgrund von überschlägigen theoretischen Betrachtungen muss der Abstand zwischen zwei Energieniveaus mindestens das Vier- bis Fünffache der maximalen Phononenenergie des Wirtsmaterials betragen, um einen effizienten Laserübergang realisieren zu können [26].

Zur Erzeugung einer Laserstrahlung mit  $\lambda = 6,45 \mu\text{m}$  entspricht die Differenz zwischen zwei Energieniveaus ungefähr  $\Delta E = 1550 \text{ cm}^{-1}$ . Das laseraktive Medium sollte somit eine maximale Phononenenergie von weniger als  $E_{ph} \approx 390 \text{ cm}^{-1}$  aufweisen. Diese Bedingung kann heute lediglich von der Gruppe der Chloride (z.B.  $\text{KPb}_2\text{Cl}_5$ ) mit einer maximalen Phononenenergie von  $E_{ph} \approx 200 \text{ cm}^{-1}$  erfüllt werden [26]. Diese Materialien besitzen jedoch einige problematische Eigenschaften, die einem einfachen Laserbetrieb entgegenwirken. Die Herstellung dieser speziellen Chlorid-Wirtsmaterialien ist äußerst

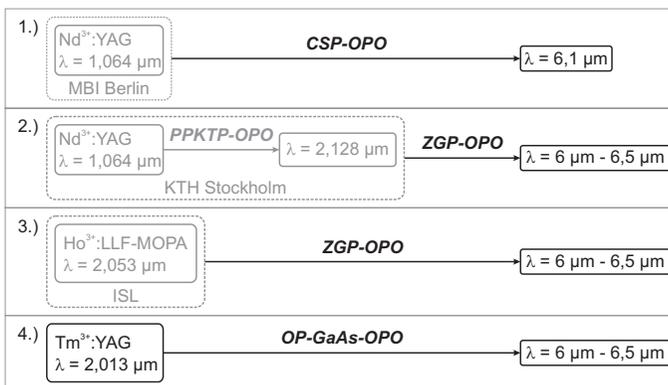
Kristallmaterial	Transmission*	Nichtlinearer Koeffizient	Kommerziell
CSP	0,94 $\mu\text{m}$ - 6,64 $\mu\text{m}$ [28]	$d_{36} = 84,5 \text{ pm/V}$ [29]	-
ZGP	1,9 $\mu\text{m}$ - 8,4 $\mu\text{m}$ [28]	$d_{36} = 75 \text{ pm/V}$ [30]	+
OP-GaAs	1,5 $\mu\text{m}$ - 12,8 $\mu\text{m}$ [15]	$d_{14} = 94 \text{ pm/V}$ [31]	-

**Tabelle 1.1:** Überblick über die ausgewählten nichtlinearen Materialien.  
(\* Absorptionskoeffizient  $< 0,2 \text{ cm}^{-1}$ )

schwierig, wobei einige Chloride (z.B.  $\text{LaCl}_3$ ) stark hygroskopisch sind. Eine Verwendung als gepulstes Lasersystem ist durch die sehr weiche Beschaffenheit (niedrige optische Zerstörschwelle) und der daraus resultierenden geringen thermo-mechanischen Widerstandsfähigkeit stark limitiert. Obwohl ein Laserübergang mit einer Wellenlänge von über  $7 \mu\text{m}$  in einem Chlorid wie z.B.  $\text{KPb}_2\text{Cl}_5$  existiert, ist ein kommerzieller Einsatz mit diesem Lasermaterial derzeit nicht absehbar [26, 27].

Infolgedessen muss auf einen nichtlinearen Konversionsprozess ausgewichen werden. Die Konversion der Laserstrahlung wird dabei mittels eines optisch parametrischen Oszillators (OPO) realisiert. Unter Erfüllung der Energie- und Impulserhaltung wird in einem OPO ein Pumpphoton mit einer Wellenlänge  $\lambda_p$  in zwei Photonen mit den Wellenlängen  $\lambda_s$  und  $\lambda_i$  aufgespalten. Hierbei spricht man jeweils von Signal- und Idlerstrahlung.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen zu OPOs wurden drei nichtlineare Kristalle ausgewählt: Cadmium-Silizium-Phosphid ( $\text{CdSiP}_2$ , CSP), Zink-Germanium-Phosphid



**Bild 1.3:** Überblick über die vier unterschiedlichen Konversionskonzepte zur Erzeugung der Strahlung im mittleren Infrarot mit OPOs.

(ZnGeP<sub>2</sub>, ZGP) und „orientation-patterned“ Galliumarsenid (OP-GaAs), deren wichtigste Eigenschaften in Tabelle 1.1 zusammengefasst sind. Nur der Transmissionsbereich von CSP erlaubt die Verwendung von kommerziellen gepulsten Laserquellen bei einer Wellenlänge von 1  $\mu\text{m}$  für eine nichtlineare Frequenzkonversion nach  $\lambda > 6 \mu\text{m}$ . Die anderen beiden Materialien müssen mit Strahlungsquellen bei einer Wellenlänge  $> 1,9 \mu\text{m}$  gepumpt werden. Alle aufgeführten Kristallmaterialien versprechen durch ihren hohen nichtlinearen Koeffizienten eine gute Konversionseffizienz. Das Material ZGP kann zudem kommerziell erworben werden.

Eine vergleichende Evaluation dieser verschiedenen Konversionsmöglichkeiten ins mittlere Infrarot für einen Wellenlängenbereich von 6  $\mu\text{m}$  - 6,5  $\mu\text{m}$  existierte noch nicht. Daher wurden basierend auf den ausgewählten drei nichtlinearen Materialien im Rahmen dieser Arbeit vier unterschiedliche Laserkonzepte untersucht, die schematisch in Bild 1.3 dargestellt sind.

- Das erste Konzept ist ein CSP-OPO, der direkt mit einem kommerziellen gepulsten Laser bei einer Wellenlänge von 1,064  $\mu\text{m}$  gepumpt wird.
- Das zweite Konzept beruht auf einem sogenannten Tandem-OPO. Die erste Stufe verdoppelt die Wellenlänge einer ebenfalls gepulsten, weit verbreiteten Strahlungsquelle bei  $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ . Mit der konvertierten Strahlung von  $\lambda = 2,128 \mu\text{m}$  wird in einer zweiten Stufe ein ZGP-OPO gepumpt.
- Das dritte und vierte Konzept basiert jeweils auf gepulsten Festkörperlaser direkt bei einer Wellenlänge von 2  $\mu\text{m}$ . Da diese Laser noch nicht kommerziell erhältlich sind, wurden für diesen Zweck vorerst nur im Labor aufgebaute Prototypen zum Pumpen der OPOs benutzt.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der Charakterisierung und Bewertung der vier vorgestellten Konzepte hinsichtlich der effizienten, kompakten und kostengünstigen Umsetzung einer Strahlungsquelle im Wellenlängenbereich von 6  $\mu\text{m}$  bis 6,5  $\mu\text{m}$ .

## 1.2 Gliederung der Arbeit

In dieser Arbeit dienen sowohl kommerzielle gepulste Lasersysteme als auch Laborprototypen als Pumpquelle für den nichtlinearen Konversionsprozess. Die wichtigsten

Merkmale der Lasermaterialien der im Labor realisierten Lasersysteme werden in Kapitel 2 vorgestellt. Dabei handelt es sich um  $\text{Tm}^{3+}$ - und  $\text{Ho}^{3+}$ -dotierte Festkörperlaser die zur Erzeugung einer gepulsten Laserstrahlung bei  $\lambda = 2 \mu\text{m}$  verwendet wurden. Zum besseren Verständnis des nichtlinearen Konversionsprozesses werden daran anschließend einige spezielle Grundlagen behandelt.

Die in Bild 1.3 aufgeführten Ansätze zur Erzeugung von Laserstrahlung im Wellenlängenbereich von  $6 \mu\text{m}$  -  $6,5 \mu\text{m}$  werden in Kapitel 3 vorgestellt. Dazu werden die drei nichtlinearen Materialien CSP, ZGP und OP-GaAs mit vier verschiedenen Strahlungsquellen gepumpt. Die Konversionskonzepte wurden zum Teil in Kollaboration mit dem Max-Born-Institut (MBI) in Berlin und der Königlich Technischen Hochschule (KTH) in Stockholm durchgeführt [32, 33].

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in Kapitel 4 zusammengefasst und abschließend diskutiert. Im Anhang befinden sich die Kristalldaten der verwendeten nichtlinearen Kristalle, der Aufbau einer eingesetzten nicht planaren Ringanordnung für den parametrischen Konversionsprozess und die mathematische Beschreibung für die nicht kollineare Phasenanpassung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde außerdem eine effizientere und kostengünstigere Alternative zu kommerziellen  $\text{Tm}^{3+}$ -Faserlasern untersucht. Diese neue Variante besteht aus einem  $\text{Tm}^{3+}$ :LLF-Scheibenlaser und kann als Pumpquelle für  $\text{Ho}^{3+}$ -dotierte Lasersysteme eingesetzt werden, wodurch sich dessen momentan hohe Anschaffungskosten reduzieren lassen. Erste experimentelle Ergebnisse hierzu sind im Anhang aufgeführt.

# 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

### Gorriz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen  
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

### Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>- 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

Laserschweißleistung 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 3-519-06227-5

**Grünenwald, Bernd**

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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

**Plaaß, Wilfried**

Zerstörschwellen und Degradation von CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 Lasermikrobohren 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 CO<sub>2</sub>-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

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 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 Nahteigenschäften 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

**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