

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Symbolverzeichnis	7
Kurzfassung der Arbeit	13
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Motivation	19
1.2 Gliederung der Arbeit	24
2 Theoretische Grundlagen	27
2.1 Festkörperlaser	27
2.1.1 Thulium ³⁺ -Laser	28
2.1.2 Holmium ³⁺ -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
3 OPOs im mittleren Infrarot	49
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 Tm^{3+} :YAG-Lasers	87
3.4.4	Fazit zur direkten Frequenzkonversion mit einem OP-GaAs-OPO	90
4	Zusammenfassung	93
A	Kristalldaten	99
A.1	Cadmium-Silizium-Phosphid (CdSiP_2 , CSP)	99
A.2	Zink-Germanium-Phosphid (ZnGeP_2 , ZGP)	101
A.3	Gallium-Arsenid (GaAs)	102
B	Realisierung der RISTRA-Kavität	103
C	Nicht kollineare Phasenanpassung	105
D	Alternative Pumpquelle für Ho^{3+}-dotierte Lasermedien	107
D.1	Überblick der Scheibenlaser bei $\lambda \approx 2 \mu\text{m}$	108
D.2	Scheibenlasermaterial aus Fluorid	109
D.3	Ergebnisse mit Tm^{3+} :LLF	111
D.3.1	Auswahl der Laserlinie mit einem Etalon	117
D.4	Fazit zum neuen Scheibenlasermaterial Tm^{3+} :LLF	119
	Literaturverzeichnis	121

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

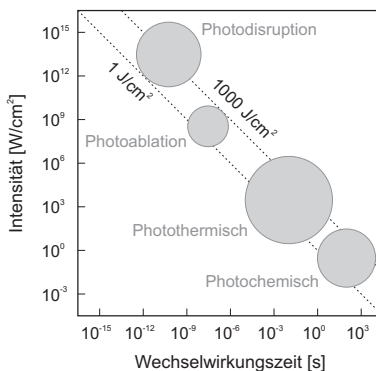


Bild 1.1: Intensitäten und Wechselwirkungszeiten für therapeutische Laseranwendungen [20].

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 J/cm^2 bis 1000 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 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 W/cm^2 kommt es zur Photoablation, bei der schlagartig ein kleines Gewebvolumen erhitzt und verdampft wird. Durch die kurze Wechselwirkungszeit im ns-Bereich wird kaum Wärme in das umgebende Gewebe eingetragen. Ab einer Intensität von mehr als 10^9 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-

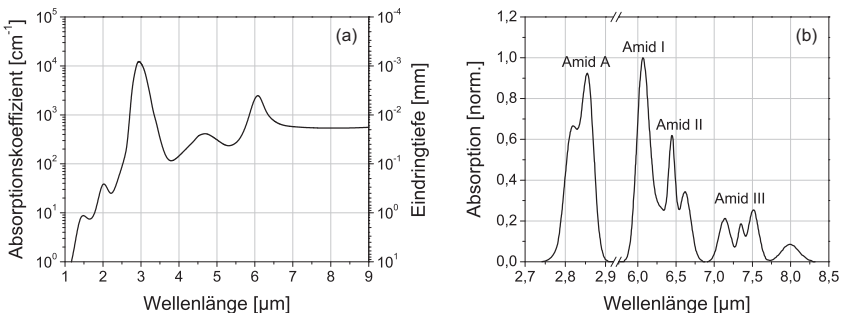


Bild 1.2: Absorptionsspektrum (a) von Wasser [21] und (b) von Peptid [6].

pen gepumpt, sodass die Emissionsdauern typischerweise in einem Bereich von mehreren 10 μs bis zu einigen 100 μs 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 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 Er^{3+} :YAG-Laser bei einer Wellenlänge von 2,94 μm und einer Pulsdauer von 100 ns [12]. Durch einen nichtlinearen Konversionsprozess wurde mit einer Repetitionsrate von 5 Hz eine Pulsenergie von 250 μJ mit Wellenlängen von 6,1 μm bis 6,73 μm 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 μm . Es war erforderlich einen kompakten und kostengünstigen Festkörperlaser zu entwickeln, welcher unter anderem folgende Merkmale aufweisen sollte:

- Wellenlängenbereich: 6 μm - 6,5 μm
- 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. KPB_2Cl_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 μm - 6,64 μm [28]	$d_{36} = 84,5 \text{ pm/V}$ [29]	-
ZGP	1,9 μm - 8,4 μm [28]	$d_{36} = 75 \text{ pm/V}$ [30]	+
OP-GaAs	1,5 μm - 12,8 μm [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. 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. KPb_2Cl_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 λ_p in zwei Photonen mit den Wellenlängen λ_s und λ_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 (CdSiP_2 , CSP), Zink-Germanium-Phosphid

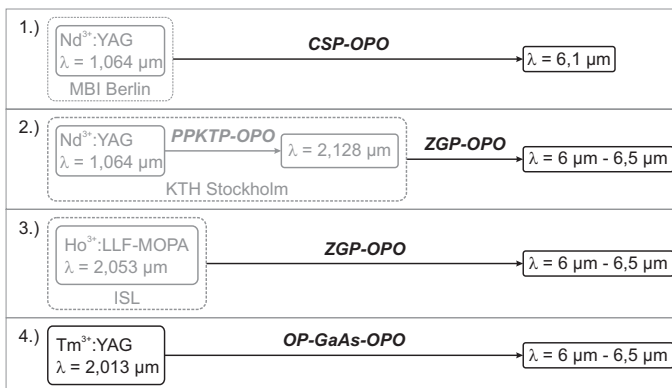


Bild 1.3: Überblick über die vier unterschiedlichen Konversionskonzepte zur Erzeugung der Strahlung im mittleren Infrarot mit OPOs.

(ZnGeP₂, 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 μm 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 μm - 6,5 μm 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 μm 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 μm . 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 μm bis 6,5 μm .

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 Tm^{3+} - und 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 Tm^{3+} -Faserlasern untersucht. Diese neue Variante besteht aus einem Tm^{3+} :LLF-Scheibenlaser und kann als Pumpquelle für 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂- 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 CO₂-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 CO₂-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

Pläß, Wilfried

Zerstörungsschwellen und Degradation von CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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