

# **Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse**

von Dr.-Ing. Angelika Beyertt  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. Dr. Willy Lüthy

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., 2010

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 2010

ISBN 978-3-8316-4002-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Kurzfassung

Mit ultrakurzen Laserpulsen ist in der Lasermaterialbearbeitung die präzise Strukturierung von metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen ohne den Einfluss störender thermischer Effekte möglich. Zuverlässige, kompakte und billige Ultrakurzpulslasersysteme sind jedoch kommerziell kaum erhältlich, dies verhindert bisher die Überführung dieser Technologie von den Forschungslaboren in die industrielle Anwendung. Hier bietet der Scheibenlaser die Möglichkeit, kompakte, anwendungstaugliche Ultrakurzpulsquellen mit hoher Pulsenergie und mittlerer Leistung bei beugungsbegrenzter Strahlqualität zu realisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Laserpulse aufgebaut. Es kommen zwei Konzepte zum Einsatz. Zum einen wurde ein System mit Gires-Tournois-Interferometer-Spiegeln zur Dispersionskompensation im Verstärkerresonator realisiert. Dadurch wird die dispersive Pulsverlängerung während der Verstärkungsphase verhindert. Dieses Konzept ermöglicht die Verstärkung von Laserpulsen im Subpikosekundenbereich mit Pulsenergien bis zu 150  $\mu\text{J}$ . Das Einsetzen optisch nichtlinearer Effekte begrenzt die Verstärkung zu höheren Pulsenergien, zudem können in diesem Energiebereich keine Laserpulse kürzer als 500 fs verstärkt werden. Der Vorteil dieses Konzepts liegt jedoch im einfachen und kompakten Aufbau. Zum anderen wird für die Verstärkung kürzerer Laserpulse ein zweites Konzept herangezogen. Bei diesem wird die dispersive Pulsverlängerung durch die resonatorinternen optischen Komponenten während der Verstärkung nicht kompensiert. Durch die Verlängerung der Laserpulse setzen nichtlineare Effekte erst bei höheren Pulsenergien ein. Die Laserpulse müssen in diesem Fall jedoch nach der Verstärkungsphase durch einen Gitterkompressor rekomprimiert werden. Die vergleichsweise niedrige Dispersion im System erlaubt den Einsatz von Gittern mit niedriger Liniendichte, so dass die Justageempfindlichkeit wesentlich geringer als in gewöhnlichen CPA-Systemen ist. Dieses zweite Konzept ist durch den Gitterkompressor etwas anspruchsvoller und weniger kompakt als das erste, erlaubt dafür aber die Verstärkung kürzerer Laserpulse. Es wurden Laserpulse im Bereich bis 100  $\mu\text{J}$  Pulsenergie mit einer Pulslänge von etwa 300 fs demonstriert.

Ein vorhandenes Modell wurde für die Simulation des Systems genutzt. Vergleiche der modellierten Werte mit experimentellen Daten zum Verstärkerbetrieb weisen eine gute Übereinstimmung auf. Anhand des Modells lassen sich für verschiedene Anfangsbedingungen Vorhersagen für die zu erwartenden Pulseigenschaften treffen.

Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Resultate bestätigen die Eignung von Yb:KYW in regenerativen Scheibenlaserverstärkern für den Aufbau von kompakten, leistungsfähigen Ultrakurzpulslasern, die vielfältige neue Anwendungsgebiete beispielsweise in Medizin oder Industrie erschließen können.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung.....</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>9</b>
<b>Extended Abstract .....</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>17</b>
1.1 Hintergrund und Zielsetzung.....	17
1.2 Strukturierung der Arbeit .....	18
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>21</b>
2.1 Prinzip des Scheibenlasers .....	21
2.2 Laseraktives Medium Yb:KYW.....	22
2.3 Ultrakurzpulsverstärkersysteme .....	25
2.4 Allgemeine Grundlagen der Ultrakurzpulsphysik.....	29
2.4.1 Dispersion.....	29
2.4.2 Kerr-Effekt und Selbstphasenmodulation .....	31
2.4.3 Pulskomprimierung .....	33
2.4.3.1 Methoden der Pulskomprimierung.....	34
<b>3 Realisierung des Verstärkers.....</b>	<b>39</b>
3.1 Strahlverlauf im Gesamtsystem.....	40
3.2 Seedlaser.....	41
3.3 Verstärkerresonator .....	43
3.4 Scheibenlasermodul.....	44
3.5 Pockelszelle .....	45
3.6 Kompressor.....	46
3.7 Diagnostikverfahren .....	46
<b>4 Verstärkung ultrakurzer Laserpulse.....</b>	<b>51</b>
4.1 Regenerativer Verstärker mit Yb:KYW.....	51
4.1.1 Verstärkerbetrieb bei verschiedenen Repetitionsraten.....	51
4.1.2 Einfluss der Seedlaserwellenlänge auf die Verstärkung .....	53
4.1.3 Einfluss der Seedlaserpulslänge .....	55

4.2	Dispersionskompensation mit GTI-Spiegeln im Resonator .....	60
4.3	Resonatorexterne Pulskomprimierung durch Gitter .....	68
4.4	Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse .....	72
<b>5</b>	<b>Modellierung des Systems mit ProPulse.....</b>	<b>75</b>
5.1	Das Modell.....	75
5.1.1	Beschreibung des Programms ProPulse .....	75
5.1.2	Parameter .....	75
5.2	Vergleich zwischen Experiment und Modell .....	78
5.2.1	Verstärker ohne Dispersionskompensation .....	79
5.2.1.1	Variation der Seedlaserwellenlängen .....	79
5.2.1.2	Verschiedene Seedlaserpulslängen.....	81
5.2.2	Verstärker mit Dispersionskompensation durch GTI-Spiegel .....	86
5.2.3	Gitterkompressor .....	93
5.2.4	Zusammenfassung des Vergleichs .....	95
5.3	Optimierungsmöglichkeiten .....	96
5.3.1	Vergrößerung der Verstärkung.....	96
5.3.1.1	Optimierte Seedlaserwellenlänge .....	97
5.3.1.2	Optimierung der Verstärkung.....	104
5.3.1.3	Resonatordesign mit Mehrfach-Durchgang durch die Scheibe.....	110
5.3.2	Vergrößerung des Strahlradius in der Pockelszelle.....	116
5.3.3	Einfluss der Seedlaserpulslänge .....	122
5.3.4	Leistungskalierung über die Fläche .....	128
5.3.5	Zusammenfassung der Optimierungsmöglichkeiten .....	128
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>131</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>137</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>145</b>
A.1	Axiale Temperaturverteilung in der Scheibe.....	145
A.2	Emissions- und Absorptionswirkungsquerschnitt .....	146
A.3	Spektrale Frequenzverteilung eines Laserpulses .....	149
A.4	Stimulierte Raman-Streuung .....	150
	<b>Danksagung .....</b>	<b>155</b>

## Extended Abstract

Compact sources of ultrashort laser pulses with energies of up to several 100  $\mu\text{J}$  are of interest in many specialized commercial applications. Ultrashort laser pulses have the ability to cleanly ablate a wide variety of materials with only small regions in the surrounding material being affected by heat and shock. Thus they have found a wide use in micromachining and biomedical applications. For use in dentistry e.g. subpicosecond pulses at the 100  $\mu\text{J}$  energy level with repetition rates in the range of 100-200 kHz seem to be desirable while other applications require pulse energies of several microjoules with shorter pulse widths.

A general problem when amplifying ultrashort pulses to such energy levels is the unacceptably high peak intensities in optical components. High peak intensities cause nonlinear pulse-shape distortions and optically induced damage. One method of reducing the peak power of ultrashort pulses in an optical amplifier is temporal stretching of the pulses to several 100 ps prior to the amplification process and subsequent recompression. This technique is called chirped pulse amplification (CPA). A disadvantage of these systems is their comparatively high complexity.

Today commercially available ultrashort pulse laser systems with high energies are mainly based on Ti:sapphire amplifiers. The CPA technique is essential in these systems. Repetition rates at high pulse energies are limited to several kHz. Ti:sapphire lasers require green pump light, and cannot be pumped directly by diodes. Thus these commercial systems are still bulky, high maintenance, and very expensive.

In recent years, demand for compact and robust turnkey ultrashort pulse sources has led to a new generation of ultrashort lasers. One solution are fiber-based chirped pulse amplification systems producing femtosecond pulses. Energies exceeding 1 mJ with average powers of about 10 W have been demonstrated.

A different approach to lowering the peak intensities in the amplifier is to enlarge the beam cross-sectional area in all critical optical components. This can be achieved in the laser active material by using the thin-disk laser concept for the regenerative amplifier. Combined with a suitable resonator design it eliminates the need for the CPA-technique in conditions of moderate power densities as presented in this thesis.

The concept of the thin-disk laser has been developed in 1992 by the Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) and the Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). The basic idea of this approach is a very thin laser crystal. The crystal is longitudinally pumped through one surface by laser diodes whereas the other surface is mounted on a heat sink. With a crystal thickness of about 100  $\mu\text{m}$  to 300  $\mu\text{m}$  one obtains nearly one-dimensional heat flow to the cooled surface. Therefore a uniform pump beam intensity

distribution can generate a temperature profile which is uniform in transverse direction and thus minimize thermal lensing effects. Nearly complete pump beam absorption can be achieved despite the small thickness of the crystal by arranging multiple passes of the pump radiation through the disk using an appropriate pump optic.

The regenerative thin-disk amplifier system presented in this thesis consists of a seed laser, a beam telescope, a beam separation unit, and the amplifier resonator. A diode-pumped Yb:glass laser oscillator that is passively mode-locked using a semiconductor saturable absorber mirror is employed as the seed laser. It is protected against feedback by an optical isolator. The mode of the seed laser beam is matched to the amplifier resonator using a telescope. A thin-film polarizer in combination with a Faraday rotator and a half-wave plate are used to separate the amplified pulses from the seed pulses. The amplifier resonator is designed for TEM<sub>00</sub> operation. A BBO Pockels cell and a thin-film polarizer are used for injection and ejection. The repetition rate of the system is limited to 45 kHz by the Pockels cell switch. When the quarter-wave voltage is applied to the Pockels cell, one seed pulse is trapped in the resonator and is amplified in the Yb:KYW thin disk over several round trips until the Pockels cell voltage is switched off again. The 100 μm thick wedged 10%-doped Yb:KYW b-cut crystal is mounted with the HR-coated back face on a heat sink in a thin-disk laser head. The disk is pumped through the AR-coated front face with a 60 W fiber-coupled diode laser at 981 nm. The thin-disk laser pump optics allows 16 pump beam passes through the disk. The pump spot diameter is 1.1 mm. Due to the weak gain more than 100 resonator round trips are necessary for the desired amplification (total gain  $G \approx 50$  dB).

The Yb:KYW thin-disk regenerative amplifier is based on two different concepts. The first one is an Yb:KYW thin-disk amplifier without CPA which uses intra-cavity group-velocity dispersion compensation with Gires-Tournois interferometer mirrors to avoid pulse stretching during amplification. This approach is suitable for the amplification of subpicosecond pulses to energy levels of several 100 μJ. The onset of nonlinear effects in this set-up inhibits the generation of shorter pulses at this energy level. The main advantage of this approach is its simple and compact set-up.

Shorter pulses can be achieved with the second approach which is based on dispersive pulse stretching due to the optical components inside the amplifier cavity during amplification and subsequent pulse compression. The Yb:KYW regenerative amplifier uses no GTI mirrors, but a grating compressor for compressing the pulses after amplification. As no stretcher is used and the dispersion inside the resonator is comparatively low significantly less dispersion is needed in the compressor compared to conventional CPA systems. Consequently, gratings with lower groove density can be used. This results in much relaxed alignment tolerances which avoids one of the problems of CPA systems. Still, the second approach is more complex than the first

one but it does allow the amplification of shorter pulses. Pulses with energies up to 100  $\mu\text{J}$  were demonstrated with a pulse width of about 300 fs in this setup.

In conclusion, it is shown that Yb:KYW regenerative amplifiers can serve as efficient sub-picosecond laser pulse sources. They can be regarded as suitable candidates for the development of compact, reliable amplifiers with high-peak-power that can be used for medical or industrial applications.

The thesis is structured as follows:

After the motivation and outline in chapter 1 the theoretical background for this work is summarized in chapter 2. The principle of the thin-disk laser is reviewed and the properties of the laser active medium Yb:KYW are summarized. Then, actual results in the field of ultra short pulse amplification are reviewed. Finally, fundamentals like dispersion and the Kerr-Effect are introduced that are important for this work because of the high intensity and the broad spectra of ultra short pulses. For the generation and amplification of ultra short laser pulses, dispersion compensation is another important topic, and therefore pulse compression schemes are explained.

Chapter 3 deals with the experimental setup of the regenerative amplifier system. The components of the amplifier are introduced and explained. Further, the diagnostic methods used to collect experimental data are summarized.

Chapter 4 first deals with the experimental results. The influence of the repetition rate of the amplifier system, the wavelength of the seed laser, and the pulse width of the seed laser are shown. Then the experimental results from the intracavity dispersion compensation with GTI mirrors and from the resonator external pulse compression by a grating compressor are discussed.

In the following chapter 5 an existing numerical model is adapted to this amplifier system. It is then used for simulation of the amplification process, and the experimental data and results of the model are compared. These comparisons demonstrate that reliable results with high confidence can be expected. In a further step the numerical model is used to make predictions for the optimization of the Yb:KYW regenerative amplifier. The effects of an increase of the roundtrip gain, an increase of the beam diameter in critical intracavity optical components, and the influence of the pulse width of the seed laser are discussed. Additionally, power scaling by increasing resonator internal beam diameters in all optical components at constant pump power density is possible. The benefit of these measures for the reduction of the pulse width and nonlinearities and the enlargement of the pulse energy is analysed for both concepts.

Finally, chapter 6 summarises the results of this work and provides a short outlook.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Es besteht ein wachsendes Interesse an ultrakurzen Laserpulsen für spezielle kommerzielle Anwendungen, insbesondere auch in der Lasermaterialbearbeitung. Hierbei steht „ultrakurz“ für Laserpulse mit einer Pulslänge unterhalb von zehn Pikosekunden. Ultrakurze Laserpulse haben einzigartige Eigenschaften, die Anwendungen ermöglichen, welche mit der jetzigen Generation industrieller Laser schlichtweg nicht möglich sind. Mit ultrakurzen Laserpulsen ist die praktisch schmelzfreie Bearbeitung fast aller Werkstoffe mit sehr geringen thermischen oder mechanischen Schäden des Werkstücks möglich. Benutzt man zur Bearbeitung Laserpulse, die länger sind als wenige Pikosekunden, stehen die lineare Absorption der Laserpulse und Wärmeleitungsprozesse im Vordergrund. Das umgebende Material heizt sich auf und es entstehen unerwünschte Schmelzzonen. Ultrakurze Laserpulse koppeln direkt an die freien Elektronen im Werkstück oder an die durch Mehrphotonenabsorption entstandenen freien Ladungsträger. Diese Prozesse führen typischerweise zu einer Sublimation oder Plasmabildung des bearbeiteten Materials bevor Wärme signifikant diffundieren kann. Somit können sehr feine Strukturen in metallischen und dielektrischen Werkstoffen erzeugt werden.

Breite Anwendungsmöglichkeiten für ultrakurze Laserpulse finden sich auch in der Medizin. Da biologische Materialien meist sehr sensitiv auf thermische Belastung reagieren, ist eine hocheffiziente Ablation ohne thermische Belastung des umgebenden Gewebes sehr vorteilhaft. Ultrakurze Laserpulse ermöglichen daher völlig neuartige Behandlungen oder können konventionelle Behandlungstechniken wesentlich verbessern oder vereinfachen. Die lokalisierte Wirkung der ultrakurzen Laserpulse erfüllt die Forderungen minimal-invasiver Behandlung. Pulsenergien im Bereich von 1-100  $\mu\text{J}$  mit Repetitionsraten bis einige hundert Kilohertz sind dabei wünschenswert für viele biomedizinische Anwendungen [1].

Als Beispiel sei hier eine Anwendung in der Zahnmedizin vorgestellt. Es ist möglich Zahngewebe, speziell auch kariöses Material, mit ultrakurzen Laserpulsen abzutragen, ohne in der empfindlichen Zahnpulpa einen kritischen Temperaturanstieg von 5,5 °C zu verursachen. Mechanisches Bohren und auch die Ablation mit längeren Laserpulsen (Er:YAG-Laser) verursacht mechanische und thermische Belastungen, die zu Mikrorissen im Zahnschmelz führen. Solche Mikrorisse sind Ansatzpunkte für neue kariöse Angriffe. Die Schockwelle, die Vibration und der Temperaturanstieg im umgebenden Zahnmaterial können beim Patienten zu erheblichen Schmerzen führen. Diese Nachteile können mit ultrakurzen Laserpulsen überwunden werden, sie ermöglichen nahezu schmerzfreie und rissfreie Präparation von Kavitäten [2]. Die

Abtragsrate für kariöses Zahngewebe ist etwa 10- mal höher als in gesundem Zahn. Zudem kann die spektrale Analyse des Laser induzierten Plasmas genutzt werden um kariöses von gesundem Zahnmaterial zu unterscheiden, so dass bei der Behandlung so wenig wie möglich vom gesunden Zahn abgetragen wird [3].

Heutige Anwendungen mit verstärkten Subpikosekunden Laserpulsen basieren vorwiegend auf Ti:Saphir-Lasersystemen. Diese sind kompliziert, teuer und komplex, und sind zudem auf den Leistungsbereich von wenigen Watt begrenzt. Tatsächliche wirtschaftliche Anwendungen sind daher noch nicht absehbar. Es besteht also beträchtliches Interesse an der Entwicklung von Ultrakurzpulslaserquellen hoher Effizienz, Kompaktheit und Zuverlässigkeit für kommerzielle Zwecke.

Ziel dieser Arbeit war es, ein kompaktes, anwendungstaugliches Ultrakurzpulsverstärkersystem auf Scheibenlaserbasis mit hoher Pulsenergie und mittlerer Leistung bei beugungsbegrenzter Strahlqualität zu realisieren. Zum einen sollten die Anforderungen für den Einsatz in der Zahnmedizin erfüllt werden, das heißt Pulsenergien von 100  $\mu\text{J}$  bei Pulslängen von 750 fs und Repetitionsraten von mindestens 10 kHz sollten demonstriert werden. Zum anderen sollten für biomedizinische Anwendungen Pulslängen von 300 fs mit niedrigeren Pulsenergien von 4  $\mu\text{J}$  realisiert werden. Dazu kommen zwei verschiedene Konzepte zum Einsatz, die in der folgenden Arbeit vorgestellt werden. Zum einen wurde ein System mit resonatorinterner Dispersionskompensation durch GTI-Spiegel realisiert, das die Verstärkung zu über 100  $\mu\text{J}$  Pulsenergie im Subpikosekundenbereich mit Repetitionsraten bis 45 kHz ermöglicht. Zum anderen wurde ein etwas komplexeres System, in dem die Laserpulse nach der Verstärkung in einem Gitterkompressor rekomprimiert werden, genutzt, um Pulse bis 300 fs Pulslänge mit Pulsenergien bis zu 100  $\mu\text{J}$  zu verstärken.

Mit dem in dieser Arbeit aufgebauten regenerativen Verstärker mit resonatorinterner Dispersionskompensation wurde die Ablation von Zahnschmelz demonstriert. Bei einer Pulsenergie von 75  $\mu\text{J}$ , einer Pulslänge von 650 fs und einer Repetitionsrate von 35 kHz wurde eine qualitativ hochwertige Zahnabtragung gezeigt, wobei die Abtragungseffizienz vergleichbar mit der Leistung einer mechanischen Turbine ist [4]. Ein Prototyp dieses Verstärkersystems wird derzeit an der Fachhochschule in Mannheim [5] für Ablationsversuche an verschiedenen Materialien eingesetzt. Die Firma Jenoptik L.O.S. [6] arbeitet an der industriellen Umsetzung des in dieser Arbeit vorgestellten Verstärkerkonzepts mit Gitterkompressor.

## 1.2 Strukturierung der Arbeit

In Kapitel 2 sind zunächst die benötigten Grundlagen zusammengestellt. Dabei werden zuerst das Prinzip des Scheibenlasers und die wichtigsten Eigenschaften des laseraktiven Materials Yb:KYW vorgestellt. Anschließend wird über den Stand der

Technik auf dem Gebiet der Ultrakurzimpulsverstärkersysteme berichtet. Danach werden für die Ultrakurzimpulstechnik wichtige Effekte, die in dieser Arbeit eine Rolle spielen, wie Dispersion und der Kerr-Effekt, eingeführt. Bei der Erzeugung und Verstärkung ultrakurzer Laserpulse ist zudem die Dispersionskompensation ein wichtiges Thema. Daher werden Methoden der Pulskomprimierung vorgestellt.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem experimentellen Aufbau des vorgestellten regenerativen Verstärkers. Die einzelnen Komponenten und die Funktionsweise des regenerativen Verstärkers werden erklärt. Zudem werden die genutzten Diagnoseverfahren erläutert.

Im darauffolgenden Kapitel 4 werden die experimentellen Ergebnisse beschrieben. Der Einfluss von verschiedenen Repetitionsraten des Verstärkers, der Wellenlänge des Seedlasers und der Pulslänge des Seedlasers auf den Verstärkerbetrieb wird dargestellt. Danach werden die experimentellen Ergebnisse zur Verstärkung ultrakurzer Pulse mit Dispersionskompensation durch resonatorinterne GTI-Spiegel und den resonatorexternen Gitterkompressor diskutiert.

In Kapitel 5 wird zunächst das zur Modellierung genutzte, bereits vorhandene Programm ProPulse [7] und die darin in dieser Arbeit verwendeten Parameter vorgestellt. Um die Zuverlässigkeit des numerischen Modells zu überprüfen, folgt eine Gegenüberstellung von experimentellen Ergebnissen und berechneten Werten anhand einiger Beispiele. Daraufhin wird das Modell genutzt, um Aussagen zur Optimierung des Systems zu machen. Dabei wird die Vergrößerung der Verstärkung, die Vergrößerung der Strahlradien in kritischen resonatorinternen Komponenten, der Einfluss der Seedlaserpulslänge und die Leistungsskalierbarkeit über die Vergrößerung der gepumpten Fläche bei gleichbleibender Pumpleistungsdichte diskutiert.

Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

# 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

### **Goritz, Michael**

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

### **Mohr, Ursula**

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkopplungsmechanismen 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

### **Kreputat, 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**

Laserschweißseignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau  
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

**Wittig, Klaus**

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungs-Laserstrahlung  
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

**Pläß, 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 Mo-lybdän  
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 Inprozess-temperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung  
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 Strahl-  
qualität von Hochleistungsdiodenlasern  
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

### Bahnmüller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur  
Qualitätssteigerung beim Laserbohren  
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

### Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Ein-  
satzmöglichkeiten beim Schweißen  
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

### Angstenberger, Birgit

Flihkraftunterstütztes Laserbeschichten  
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

### Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminium-  
werkstoffen mit Festkörperlasern für den Karos-  
seriebau  
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 Her-  
stellung verbesserter Dünnschichttransistoren  
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

### Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung  
des Weichlötens 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 Laserstrahlschwei-  
ßen 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 laserintegrier-  
ten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen  
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

### Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montage-  
konzept in der Mikrosystemtechnik  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

### Schinzal, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminium-  
werkstoffen für Anwendungen im Automobilbau  
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

### Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-  
CVD Synthese von Diamant und amorphen Koh-  
lenstoffen  
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-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Flexibilität 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 keramischen 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 Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern  
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

**Guido Hergenhan**

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Systemkonzept und experimentelle Verifizierung  
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

**Klaus Goth**

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- 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 Präzision 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 Aluminiumgusslegierungen 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. habil. 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 Kurzpulsverstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

### **Jiancun Gao**

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheibenlaser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzverdopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

### **Wolfgang Gref**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokussmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

### **Michael Weikert**

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

### **Julian Sigel**

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fertigungssystemen

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 Lasermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

### **Dirk Lindenu**

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 Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

### **Mikhail Larionov**

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen 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 Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

### **Thomas Kübler**

Modellierung und Simulation des Halbleiterscheibenlasers

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 Aluminiumlegierungen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

### **Detlef Breitting**

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