

Hochrepetierende Kurzpuls- Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich

von Dr.-Ing. Christian Stolzenburg
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. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. phil. nat. Jürg Balmer (Universität Bern)
Mitberichter: PD Dr. rer. nat. Adolf Giesen (DLR)

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 2011

ISBN 978-3-8316-4041-6

Printed in EC

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Liste der verwendeten Symbole	9
Kurzfassung	15
Extended Abstract	17
1 Einleitung	21
1.1 Motivation	21
1.2 Strukturierung der Arbeit	22
2 Der Scheibenlaser	24
2.1 Das Prinzip des Scheibenlasers	24
2.2 Das laseraktive Material Yb:YAG	26
2.2.1 Materialparameter von Yb:YAG	28
2.3 Erzeugung von Laserpulsen im Scheibenlaserdesign	29
3 Theoretisches Modell des Scheibenlasers	32
3.1 Zielsetzung der Modellierung	32
3.2 Aufstellen der Ratengleichungen	33
3.2.1 Absorbierte Pumpleistungsdichte	34
3.2.2 Ratengleichung für die Besetzungsdichte	37
3.2.3 Ratengleichung für die resonatorinterne Leistungsdichte	39
3.2.4 Startenergie des Verstärkungsprozesses	40
3.2.5 Integration der Ratengleichungen	45
3.2.6 Vergleich des Modells mit experimentellen Daten	47
3.3 Spatial-hole-burning	51
3.3.1 Modellierung des Spatial-hole-burnings	52
3.3.2 Reduktion des Spatial-hole-burnings	60
3.3.3 Vergleich des Modells mit experimentellen Daten	64

3.4	Transversale Moden	68
3.4.1	Modellierung radialsymmetrischer Moden	68
3.4.2	Vergleich des Modells mit experimentellen Daten	71
3.5	Erweiterung des Modells der Ratengleichungen	74
3.5.1	Ratengleichungen des erweiterten Modells	74
3.5.2	Bestimmung der Koppelparameter ξ_{SHB} und ξ_{TEM}	76
3.5.3	Vergleich des erweiterten Modells mit experimentellen Daten	78
3.6	Grenzen des Modells	79
3.7	Bestimmung der Laserparameter	80
3.7.1	Pulsenergie	80
3.7.2	Pulsenergiestabilität	80
3.7.3	Mittlere Leistung	81
3.7.4	Wirkungsgrad	81
3.7.5	Pulsdauer und Pulsform	82
3.7.6	Spektrum	82
4	Grundlagen nichtlinearer dynamischer Systeme	83
4.1	Stabilität von Lasern	83
4.2	Grundlagen dynamischer Systeme	84
4.2.1	Verhulst'sche Abbildung	84
4.2.2	Ruhelage und Stabilität	85
4.2.3	Der Weg ins Chaos	86
4.3	Der Pulslaser als nichtlineares dynamisches System	88
4.3.1	Der Pulslaser als eindimensionales dynamisches System	89
4.3.2	Der Pulslaser als mehrdimensionales dynamisches System	91
4.3.3	Kontrollparameter für den Pulslaser als dynamisches System	94
5	Grundlagen der Frequenzverdopplung	95
5.1	Grundlagen der nichtlinearen Optik	95
5.2	Phasenanpassung für die Frequenzverdopplung	96
5.3	Konversionseffizienz der Frequenzverdopplung	98
5.3.1	Ebene Welle ohne Abnahme der Grundwelle	98
5.3.2	Ebene Welle mit Abnahme der Grundwelle	99
5.3.3	Fokussierter Gaußstrahl ohne Abnahme der Grundwelle	99
5.4	Resonatorinterne Frequenzverdopplung	101
5.5	Der nichtlineare Kristall LiB_3O_5	102
6	Cavity-dumping	105
6.1	Experimenteller Aufbau	105

6.2	Laserleistung	106
6.3	Variation der Betriebsparameter	107
6.3.1	Einfluss der Repetitionsrate	108
6.3.2	Einfluss der Verstärkungszeit	110
6.3.3	Einfluss der Verstärkung pro Resonatorumlauf	114
6.3.3.1	Pumpleistungsdichte	115
6.3.3.2	Durchgangszahl und Anzahl der Scheiben	116
6.3.3.3	Resonatorinterne Verluste	118
6.3.3.4	Verstärkungsreduktion V_{SHB} und V_{TEM}	119
6.3.3.5	Einfluss des Auskoppelgrads	120
6.3.4	Einfluss der Resonatorlänge	122
6.4	Pulslänge	124
6.4.1	Maximaler Auskoppelgrad $T_{oc}^{(max)}$	124
6.4.2	Minimaler Auskoppelgrad $T_{oc}^{(min)}$	125
6.4.3	Schaltzeit Δt_s	126
6.4.4	Resonatorlänge	127
6.4.5	Mögliche Pulslängen	127
6.5	Belastung resonatorinterner Komponenten	128
7	Resonatorinterne Frequenzverdopplung	131
7.1	Experimenteller Aufbau	131
7.2	Radiale Temperaturverteilung des nichtlinearen Kristalls	134
7.3	Laserleistung	135
7.4	Variation der Betriebsparameter	138
7.4.1	Einfluss der Repetitionsrate	138
7.4.2	Einfluss der Verstärkungszeit	139
7.4.3	Einfluss der Verstärkung pro Resonatorumlauf	141
7.4.3.1	Pumpleistungsdichte	141
7.4.3.2	Durchgangszahl und Anzahl der Scheiben	142
7.4.3.3	Resonatorinterne Verluste	144
7.4.3.4	Verstärkungsreduktion V	145
7.4.4	Einfluss der Wandlungseffizienz	147
7.4.5	Einfluss der Resonatorlänge	148
7.5	Pulslänge	150
7.5.1	Einfluss von $T_{oc}^{(max)}$ und Δt_s	150
7.5.2	Mögliche Pulslängen	151
7.6	Spektren	152
7.7	Belastung resonatorinterner Komponenten	153

8 Stabilisierung der Pulsenergie	155
8.1 Passive Stabilisierung	155
8.1.1 Erhöhung der Startenergie	155
8.1.2 Nichtlineare Verluste	157
8.2 Aktive Stabilisierung	158
8.2.1 Regelung der Verstärkungszeit	158
9 Zusammenfassung der Ergebnisse	161
Anhang: Das Extra Photon	164
Literaturverzeichnis	167
Danksagung	175

Kurzfassung

Nachdem sich das Konzept des Scheibenlasers im Dauerstrichbetrieb aufgrund seiner guten Strahlqualität und seines hohen Wirkungsgrads im Hochleistungsbereich industriell bewährt hat, gewinnt es zunehmend auch für den gepulsten Betrieb an Interesse. Die Forderung nach hoher Produktivität einer Laserbearbeitung verlangt nach Lasersystemen mit großer Repetitionsrate und mittlerer Leistung, wobei sich für viele Anwendungen kurze Laserpulse im Nano- und Mikrosekundenbereich bewährt haben.

Zentraler Inhalt der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von hochrepetierenden Scheibenlasern zur Erzeugung kurzer Laserpulse. Ein vielversprechender Ansatz zur Pulserzeugung mit hoher Pulswiederholrate stellt dabei das Cavity-dumping dar, das durch seine geringe Komplexität und hohe Flexibilität für die industrielle Umsetzung besonders geeignet ist. Die für viele Anwendungen vorteilhafte Wellenlänge im grünen Spektralbereich, wie sie durch resonatorinterne Frequenzverdopplung erzeugt werden kann, ist ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit.

Um Aussagen über mögliche Laserparameter und deren Optimierung treffen zu können, wird ein Modell basierend auf den Ratengleichungen vorgestellt. Effekte wie das Spatial-hole-burning in der Scheibe und transversale Moden müssen dabei mitberücksichtigt werden. Die Betrachtung der nichtlinearen Dynamik des Pulslasers erlaubt es, das Auftreten von optischen Instabilitäten vorherzusagen. Der resonatorinternen Frequenzverdopplung wird durch einen nichtlinearen Auskoppelgrad Rechnung getragen.

In Abhängigkeit der Laserparameter gibt es Frequenzbereiche, in denen Instabilitäten der Pulsenergie auftreten können. Diese Instabilitäten, die sich bei Repetitionsraten von 1 kHz bis 100 kHz beobachten lassen, limitieren das Potential der Pulserzeugung durch Cavity-dumping. Experimentell konnte stabiler Pulsbetrieb bis zu einer Repetitionsrate von 1 MHz demonstriert werden. Durch Stabilisierungskonzepte, wie die Überwachung des Auskoppelzeitpunkts, konnte bei sonst kritischen Repetitionsraten bis 100 kHz stabiler Betrieb mit einer mittleren Leistung von über 500 W realisiert werden.

Die Pulserzeugung mit resonatorinterner Frequenzverdopplung profitiert von der nichtlinearen Auskopplung durch die Frequenzkonversion. Fluktuationen der Pulsenergie werden dadurch in einem weiten Parameterbereich verhindert. Eine mittlere Leistung von über 100 W konnte bei der zweiten Harmonischen erreicht werden.

Extended Abstract

During the last decades the laser has emerged from its first demonstration in 1960 into a widely spread technology. Many applications within medical, information and measurement technology as well as materials processing rely on the unique properties of laser radiation. Lasers for materials processing include CO₂-lasers, solid-state lasers, diode lasers and excimer lasers and cover the spectral range from infrared to ultraviolet radiation. For a long time the CO₂-laser held a dominating role due to a high output power and a beam quality close to the diffraction limit. However, its wavelength of about 10 μm requires a complex beam delivery system from the laser source to the workpiece based on free space propagation. A more flexible solution are optical fibers, which can be applied for the beam delivery of solid-state lasers with a wavelength in the range of 1 μm. For applications within materials processing this wavelength has additional advantages such as a higher absorption of the laser radiation at the workpiece and less absorption in the plasma generated during processing. In the past the available beam quality at high output power suffered from the unfavorable heat removal from the conventional rod-shaped laser materials. Progress in the development of high-power diode lasers resulted in new designs for diode-pumped solid-state lasers, among which the thin-disk laser and the fiber laser are the most popular.

Being developed 15 years ago at the Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) of the University of Stuttgart and at the Institut für Technische Physik of the German Aerospace Center (DLR), the thin-disk laser design has successfully entered the industrial market. The key feature of this laser concept is the disk-shaped laser material, which is directly mounted onto a heat sink with its highly-reflective backside. The effective and longitudinal removal of the waste heat enables the efficient operation of new laser materials such as Ytterbium-doped crystals. Due to the primarily axial heat flow, only a small phase distortion and depolarization is generated by the disk, allowing for excellent beam quality and high output power, simultaneously. Today, thin-disk lasers in continuous-wave operation are commercially available up to several kilowatts of output power.

Every application has certain requirements for the laser source. Besides lasers in continuous wave operation, as they are used for cutting and welding, many applications require lasers working in pulsed operation. While the energy density and the pulse duration define the process at the workpiece's surface, the repetition rate of the laser source

is a parameter to increase the productivity of the application. Therefore, the demand for high-repetitive lasers with repetition rates ranging from several 10 kHz to MHz has increased in recent years.

When increasing the repetition rate, the occurrence of optical instabilities caused by the laser dynamics leads to fluctuations of the pulse energy and limits the performance of the laser. Another important parameter is the wavelength of the laser, especially when processing highly reflective materials like copper or semiconductor materials like silicon. Laser radiation in the green or ultraviolet spectral range is required for these materials to ensure sufficiently high absorption.

Possible pulse durations of a laser source are defined by the mechanism to achieve pulsed operation. Long pulses in the millisecond range are generated by pulsed pumping of a continuous-wave laser. The shortest pulses are delivered by mode-locked oscillators with pulse durations ranging from femto- to picoseconds at repetition rates in the MHz to GHz range. Pulse durations in the nano- and microsecond range can be accessed by Q-switching or cavity-dumping. Both mechanisms require a fast optical switch inside the cavity to achieve pulsed operation. While Q-switching modulates the intracavity losses, cavity-dumping relies on a switchable transmission of the output coupler. Its rugged, compact setup and its great flexibility to generate different pulse durations make this concept well suited for industrial applications. Additionally, cavity-dumping offers great potential for high-repetitive pulsed operation.

This work focuses on the pulse generation by cavity-dumping applied to the thin-disk laser design. The achievable laser parameters are of special interest, as well as operational conditions, that lead to instabilities of the pulse energy. Besides generating pulses in the infrared spectral range, the green spectral range is covered as well by employing intracavity frequency conversion. To describe the process of pulse generation, a model of the thin-disk laser is presented and solved numerically. The model is used to characterize the performance of the thin-disk laser and define possible ranges for the laser parameters. The results are compared to experimental data of an Yb:YAG thin disk laser.

After a brief presentation of the thin-disk laser principle, its presently most popular laser material Yb:YAG and an overview of the most common pulse generation techniques, a model based on the rate equations is elaborated in chapter 3 to describe the interaction of an electro-magnetic wave with the laser disk as well as the pulse built up inside the resonator cavity. The time-resolved numerical integration of the rate equations allows for quantitative prediction of the laser parameters. The start photons for the pulses originate from that fraction of the disk's fluorescence radiation, which can be coupled into the cavity due to its spatial, spectral and polarization properties. The comparison of the

rate equation model to experimental data shows a rather large disagreement, requiring further improvement of the model. According to the rate equations, more pulse energy is expected than can be verified experimentally. While the gain in the disk can be calculated with sufficient accuracy, an additional loss mechanism is found when a great amount of energy is extracted from the disk. That reduction of the effective gain in the disk is caused by an axial inversion grating generated by spatial-hole-burning (SHB) as well as the transverse mode profile. When integrating these two effects into the rate equation model a good agreement between the model and experimental data is obtained. To decrease the complexity of the model and the required computation time, the reduction of the effective gain due to SHB and the transverse mode profile is described as a virtual loss mechanism. It is shown that this gain reduction diminishes with a time constant in the range of the fluorescent lifetime and is primarily equalized by the pumping mechanism and by reabsorbed fluorescence radiation.

The occurrence of instabilities of the pulse energy demands for a closer look at the nonlinear dynamics of pulsed lasers. Chapter 4 summarizes the basic mechanisms that lead to fluctuations and shows that a pulsed laser can be described as a one-dimensional dynamic system. The transfer function, mapping the amount of energy stored in the disk at the beginning of a pulse period to that at the end, can be used to classify the laser operation as stable or unstable.

By defining the conversion efficiency as a nonlinear transmission of the cavity, the intracavity frequency conversion is integrated into the model. Three models describing the conversion efficiency are reviewed in chapter 5. For the beam dimensions inside the nonlinear crystal used in this work, a plane-wave assumption is justified.

The pulse generation employing the cavity-dumping principle, which is reviewed in chapter 6, offers great flexibility to adjust the laser parameters and to achieve high pulse energies as well as high repetition rates. Optical instabilities limit the attainable efficiency at repetition rates of a few 10 kHz. At high repetition rates in the range of 1 MHz the laser is inherently stable. The threshold for optical instabilities can be raised by increasing the gain in the disk or by decreasing the intracavity losses or the losses caused by spatial-hole-burning and the transversal mode profile. The range of possible pulse durations is primarily determined by the optical switch inside the cavity. By means of the switching time and the transmission of the output coupler before and after switching, the pulse duration can be adjusted between a few nanoseconds to several microseconds with the same setup. The highest repetition rate demonstrated experimentally using an electro-optic switch was 1 MHz. An average power of more than 130 W and a pulse duration of 19 ns was achieved.

Chapter 7 covers the pulsed laser operation employing intracavity frequency doubling. The pulse built up is terminated by a fast switch inside the cavity. Depending on the repetition rate and the conversion efficiency, the pulses are thereby cut on their raising or falling edge, respectively. Thus a wide range of pulse durations is accessible. For low intracavity losses an optical efficiency of more than 50% is possible with an optimized conversion efficiency. A noticeable feature when employing the nonlinear output coupling through second-harmonic generation is the almost complete suppression of optical instabilities. Just when operating with a low conversion efficiency and a long amplification period the stability limit can be reached. Since the pulses are coupled out from the cavity primarily before switching the cavity, the switch itself has only little influence on the parameter of the laser pulse at the second harmonic. Amplification period, cavity length, number of passes through the disk per round trip and conversion efficiency are factors to influence the pulse duration. Just by adjusting the amplification period the pulse duration was tunable between 200 ns and 800 ns. At a repetition rate of 50 kHz an average power of more than 100 W and a pulse duration of 300 ns could be demonstrated at the second harmonic.

Since the onset of optical instabilities limits the possibilities provided by the cavity-dumping technique, methods for the stabilization of the output energy are of special interest. These methods, which are discussed in chapter 8, can be divided into passive and active stabilization concepts, where the latter require an active monitoring of the laser's performance. One passive concept relies on the increase of the starting energy provided for the pulse generation. For the entire suppression of instabilities starting energies of a few microjoules are necessary, which consequently leads to multi-stage laser amplifiers. Since nonlinear losses stabilize the laser operation as well, it is possible to use frequency doubling for the suppression of instabilities in an infrared laser. The required conversion efficiency in this case has to be minimized. For a small range of repetition rates fluctuations can be stabilized with just a slight reduction in efficiency. The greatest flexibility is offered by an active monitoring of the amplification period. The switching of the cavity is triggered by a photodiode detecting the intracavity power density. Instabilities can be suppressed for the entire range of repetition rates. Experimentally an average power of 520 W was achieved. The pulse energy showed standard deviations below 2% also for repetition rates below 100 kHz.

Chapter 9 summarizes the results for modeling the pulsed disk laser as well as generating short laser pulses at high repetition rates. The results of this work led to two patents [1, 2] and new pulsed lasers in the infrared and green spectral range, which are now already commercially available.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Nach der erstmaligen Demonstration eines Lasers durch MAIMAN [3] im Jahr 1960, vor nicht einmal 50 Jahren, wurde der Laser als eine Lösung auf der Suche nach einem Problem verspottet. Mittlerweile ist die Lasertechnologie aus der Medizintechnik, der Informations- und Nachrichtentechnik, der Messtechnik sowie der Materialbearbeitung nicht mehr wegzudenken und viele Anwendungen lassen sich nur durch den Einsatz von Lasern realisieren.

Lange Zeit wurden Strahlquellen für die Materialbearbeitung vom CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 μm dominiert, mit dem hohe Ausgangsleistungen und eine gute Strahlqualität erzielt werden können. Der Einsatz von Festkörperlaser bei Wellenlängen um 1 μm brachte neben anwendungstechnischen Vorteilen, wie höhere Absorption auf dem Werkstück und geringer Absorption in dem bei der Bearbeitung entstehenden Plasma, die große Flexibilität der Übertragbarkeit der Strahlung durch eine flexible Glasfaser. Die Strahlqualität der Laser war jedoch im oberen Leistungsbereich durch thermische Effekte begrenzt. Die Verfügbarkeit von Hochleistungsdiodenlasern ebnete neuen Konzepten für Festkörperlaser wie dem Scheibenlaser und dem Faserlaser den Weg. Das Prinzip des Scheibenlasers, das am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart und am Institut für Technische Physik des DLR entwickelt wurde [4], ermöglicht die effiziente Erzeugung hoher Ausgangsleistungen bei gleichzeitig guter Strahlqualität. Heutzutage sind im Dauerstrichbetrieb Ausgangsleistungen von mehreren Kilowatt kommerziell erhältlich.

Je nach Anwendung werden Laser im Dauerstrich- oder im gepulsten Betrieb eingesetzt. Die mit einem Puls bearbeitbare Fläche sowie die an der Materialoberfläche stattfindenden Prozesse hängen von der Pulsdauer und der Energiedichte der Laserpulse ab. Ein breites Anwendungsspektrum erschließt sich durch den Einsatz von Kurzpulsstrahlquellen. Bei vielen Anwendungen lässt sich eine Steigerung der Produktivität durch eine Erhöhung der Repetitionsrate bei sonst gleichen Pulsparametern erreichen. Daher besteht ein großes Interesse an der Entwicklung hochrepetierender Strahlquellen im Bereich einiger 10 kHz bis MHz. Neben der Pulslänge und Pulsenergie ist für viele Pro-

zesse die Wellenlänge der Laserpulse entscheidend, um eine ausreichende Absorption auf dem Werkstück zu erzielen. Beispielsweise gestaltet sich die Bearbeitung von Halbleitern für die Mikroelektronik und Photovoltaik als schwierig, da die Photonenenergie von Strahlquellen im infraroten Spektralbereich unterhalb der Bandlücke dieser Materialien liegt. Zur Bearbeitung werden deshalb häufig Excimerlaser mit Wellenlängen im UV-Bereich [5, 6] oder frequenzverdoppelte Laser im grünen Spektralbereich eingesetzt [7, 8], mit denen sich Halbleiter, aber auch Metalle wie z.B. Kupfer, besser bearbeiten lassen.

Durch die Methode zur Erzeugung der Laserpulse werden die möglichen Pulslängen bereits festgelegt. Lange Pulse mit Pulslängen im Millisekundenbereich erhält man durch gepulste Anregung eines Dauerstrichlasers. Die Erzeugung ultrakurzer Pulse im Piko- und Femtosekundenbereich erfordert modengekoppelte Oszillatoren, die Pulse mit einer Wiederholrate von einigen Megahertz bis in den Gigahertzbereich liefern. Bisher wurde über eine mittlere Leistung von 80 W und eine Pulsenergie von 16 μJ berichtet [9, 10]. Eine weitere Steigerung kann in Verstärkern erfolgen. Kurze Laserpulse im Nano- und Mikrosekundenbereich lassen sich durch schnelle optische Schalter im Resonator mittels Güteschaltung und Cavity-dumping erzielen. Bei der Güteschaltung werden die Verluste im Resonator periodisch moduliert. Beim Cavity-dumping wird die sich im Resonator aufbauende Leistung durch den Schalter ausgekoppelt. Bei der Erzeugung hochrepetierender Laserpulse zeigen sich jedoch bei beiden Betriebsweisen Instabilitäten in der Laserdynamik, die es genauer zu untersuchen gilt. Die Erzeugung kurzer Laserpulse durch Cavity-dumping zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Anpassung der Pulsparameter der erzeugten Laserstrahlung und durch effizienten Betrieb auch bei hohen Repetitionsraten aus. Der robuste Aufbau mit seiner vergleichsweise geringen Komplexität ist für den industriellen Einsatz gut geeignet. Daher steht diese Art der Pulserzeugung im Mittelpunkt dieser Arbeit. Neben der Erzeugung von Pulsen im infraroten Spektralbereich sollen auch die für zahlreiche Anwendungen vorteilhaften Pulse im grünen Spektralbereich, die sich effizient durch resonatorinterne Frequenzverdopplung erzielen lassen, betrachtet werden.

1.2 Strukturierung der Arbeit

Neben der Einleitung und einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse weist diese Arbeit sieben Kapitel auf. Dem Kapitel 2 mit einer kurzen Beschreibung des Prinzips des Scheibenlasers sowie der Erzeugung von Laserpulsen im Scheibenlaserdesign schließen sich drei Kapitel an, welche die Grundlagen für die Betrachtung gepulster

Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich legen. Hierzu wird in Kapitel 3 ein numerisches Modell vorgestellt, mit dem die Vorgänge in der Laserscheibe und dem Resonator beschrieben und Aussagen über die Laserparameter getroffen werden können. Das Modell mit seinen Verfeinerungen wird dabei direkt mit experimentellen Daten verglichen. Da das Auftreten von Instabilitäten der Pulsenergie einen kritischen Betriebszustand darstellt, den es zu vermeiden gilt, wird in Kapitel 4 die nichtlineare Dynamik des Lasers näher untersucht. Die Überlegungen basieren auf den von MÜLLER [11] vorgestellten Betrachtungen bei regenerativen Scheibenlaserverstärkern. Den Grundlagen der resonatorinternen Frequenzverdopplung widmet sich Kapitel 5.

In den Kapiteln 6 bis 8 werden gepulste Lasersysteme vorgestellt. Neben experimentellen Daten werden Simulationen präsentiert, um Grenzen und Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Kapitel 6 befasst sich mit der Erzeugung kurzer Laserpulse im infraroten Spektralbereich durch Cavity-dumping. Kurzpulslaser mit resonatorinterner Frequenzverdopplung werden in Kapitel 7 näher untersucht. Auch bei der resonatorinternen Frequenzverdopplung können die Laserparameter wie beispielsweise die Pulslänge flexibel an verschiedene Anwendungen angepasst werden [12, 13]. In Kapitel 8 werden verschiedene Ansätze diskutiert, mit denen die Pulsenergie der zuvor betrachteten Lasersysteme stabilisiert werden kann.

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

Gorritz, 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

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 Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-8

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

Plañ, Wilfried

Zerstörschwellen 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.

Leistungskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluidynamische 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 3-89675-819-9

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,
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 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
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 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. 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 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 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 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 Naht-eigenschaften 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 Halbleiter-scheibenlasers

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 Aluminium-legierungen mit Laserstrahlung: Prozessver-ständnis 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