

# **Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser**

von Dr.-Ing. Christoph Neugebauer  
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. rer. nat. Heinz Kück

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., 2012

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 2012

ISBN 978-3-8316-4178-9

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

# Kurzfassung

Nach der Heranführung an das Thema dieser Arbeit in Kapitel 1, werden in Kapitel 2 grundlegende Modelle zur Strahlpropagation vorgestellt. Breiten Raum wird dabei dem Collins-Integral eingeräumt, welches zur Berechnung der Phasenfront und der Intensitätsverteilung durch optische Systeme herangezogen wird. Neben den Propagationsmodellen werden das Design und die besonderen Eigenschaften des Scheibenlasers näher vorgestellt. Dabei stehen die durch die Pumpleistung im laseraktiven Medium induzierten Wellenfrontstörungen, welche eine hohe Grundmodeleistung verhindern, im Vordergrund. Das Kapitel wird mit der Vorstellung der eingesetzten optischen Messmethoden beendet. Dabei wird im Speziellen auf die Interferometrie und Thermographie eingegangen.

Die Vorstellung von Bauformen, Einsatzgebieten und aktuell verwendete Aktuatoren adaptiver Optiken wird in Kapitel 3 durchgeführt. Insbesondere wird eine Abgrenzung zwischen den Begriffen “adaptive” und “aktive Optiken” vorgenommen und eine Bewertung zur Fähigkeit der vorgestellten Konzepte für den resonatorinternen Einsatz abgegeben.

Die beiden für den Scheibenlaserresonator entwickelten Lösungsansätze einer aktiven Optik sind Gegenstand des vierten Kapitels. Das erste Konzept dient der Kompensation der asphärischen Anteile der Wellenfrontstörung, die im gepumpten Bereich des laseraktiven Mediums im Scheibenlaser entstehen. Die Erzeugung maßgeschneiderter Moden ist der Hauptverwendungszweck des zweiten Spiegelkonzeptes. Nach der genauen Definition der benötigten Deformationen auf der aktiven Fläche von wenigen Mikrometern und den vorhandenen Voraussetzungen werden die Konzepte mit ihren Varianten und deren Arbeitsweise im Detail dargestellt. Auf die einzelnen Spiegel abgestimmte Simulationsmodelle überprüfen die Funktionsweise und die Auswirkungen der jeweilig vorherrschenden Fertigungstoleranzen. Mit Hilfe der optischen Messmethoden wird die Oberflächenqualität ermittelt und auf die Einsatztauglichkeit im Laserresonator hin überprüft. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Funktionstests der aufgebauten Spiegelprototypen mit den Ergebnissen der Simulationsrechnungen und die Bewertung der Simulationsmodelle auf ihre Eignung die Spiegel zu beschreiben, bilden den Abschluss dieses Kapitels.

Kapitel 5 beschreibt den Einbau des Spiegelkonzeptes zur Erzeugung maßgeschneiderter Moden auf Basis elektrischer Heizkreise in einen Scheibenlaserresonator und zeigt dessen Funktionsfähigkeit. Hierfür werden die benötigten Oberflächenformen des Spiegels für vorab bestimmte maßgeschneiderte Moden über das Collins-Integral berechnet und mit Hilfe des Simulationsmodells die initialen Betriebsparameter bestimmt, die abschließend experimentell verifiziert werden. Beim Einsatz der aktiven Optik wird eine gute qualitative wie auch quantitative Übereinstimmung zwischen den experimentellen Ergebnissen und den Vorausberechnungen beobachtet. Jedoch können durch die noch unzureichende Oberflächenqualität nicht alle vorgesehenen Moden realisiert werden.

Diese Arbeit zeigt, dass aktive Optiken auf Basis thermisch aktivierter Aktuatoren einen preisgünstigen Lösungsansatz bieten. Die erarbeiteten Konzepte besitzen das Potenzial, sowohl die asphärischen Anteile der thermisch induzierten Phasendeformation zu kompensieren als auch die Erzeugung von maßgeschneiderten Moden im Scheibenlaserresonator zu ermöglichen. Jedoch ist der uneingeschränkte Einsatz der konzipierten Optiken mit der derzeitigen Aufbau- und Verbindungstechnik noch nicht möglich, da die erforderliche optische Oberflächenqualität bei den Spiegeln derzeit nicht erreicht wird.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Liste der verwendeten Symbole</b>	<b>9</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>15</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>19</b>
2.1 Propagation von Strahlungsfeldern . . . . .	19
2.2 Scheibenlaser . . . . .	24
2.3 Optische und thermische Messmethoden . . . . .	27
<b>3 Adaptive Optiken</b>	<b>33</b>
3.1 Bauarten und Einsatzgebiete adaptiver Optiken . . . . .	34
3.2 Aktuatoren für aktive Spiegel . . . . .	36
<b>4 Radialsymmetrische thermisch aktive Optiken</b>	<b>39</b>
4.1 Zielsetzung und Rahmenbedingungen . . . . .	39
4.2 Simulation . . . . .	41
4.3 Stufenspiegel . . . . .	42
4.4 Elektro-thermischer Heizkreisspiegel . . . . .	65
<b>5 Erzeugung definierter Resonatormoden mittels aktiver Optik</b>	<b>91</b>
5.1 Resonator . . . . .	91
5.2 Errechnung der benötigten Spiegeloberfläche . . . . .	95
5.3 Simulation und experimentelle Bestimmung der Betriebsparameter .	98
5.4 Implementierung und Funktionsnachweis im Resonator . . . . .	100
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>111</b>

# Extended Abstract

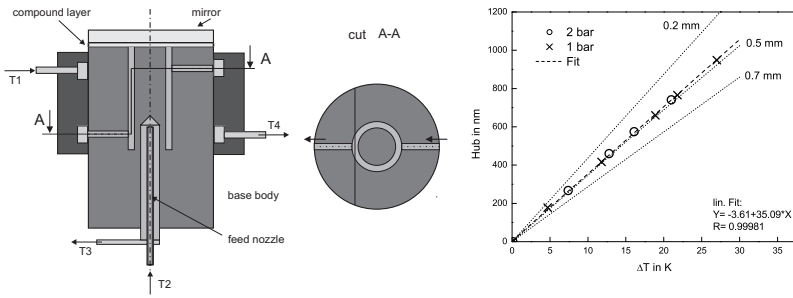
Within the last 50 years since the invention of the laser, an enormous development has taken place [1, 2]. Nowadays many applications in industry, research and medicine are unimaginable without the laser in all its varieties [3]. In addition to the fiber laser the thin disc laser, as concepts of solid state lasers, plays an important role in the field of material processing. Multimode output with power in the order of several kW is easily achieved [4, 5]. The still existing thermally induced wave front distortions in the gain material of a thin disc laser limits the development of high power single-mode disc lasers. The compensation of such phase front distortions for this kind of laser has not yet been commercially realized [6].

With the development in the field of laser sources an enormous progress has taken place in the aspect of active and adaptive optics. At the beginning of the 90s the US army had given up their top secret level on development projects on adaptive optics and, therefore also on active optics [7]. This knowledge was rapidly integrated into civilian science. Within a few years the technology expanded to encompass many applications in astronomy, microscopy, metrology and laser technology [8, 9, 10]. For every purpose, different solutions related to mirror surfaces, actuators and needed lateral resolutions were found.

The aim of this thesis is to combine the technology of active optics with the thin disc laser technology to increase the output power in single-mode operation and to be able to create various customized modes. Therefore, two different concepts with thermal mechanical actuators will be demonstrated. Simulation and detailed knowledge of beam propagation are necessary to design these concepts in a reliable and cost efficient way. Various methods, describing the beam propagation, are discussed in chapter 2.1.2. Most important for this thesis is the Collins-Integral [23], which calculates the phase and intensity distribution of an electromagnetic wave propagating through an optical setup by knowing its ABCD-matrix.

The motivation for the first concept is to compensate the thermal induced phase distortion in the laser active material interactively by phase conjugation. It is therefore necessary to measure the phase distortion of the pumped thin disc laser

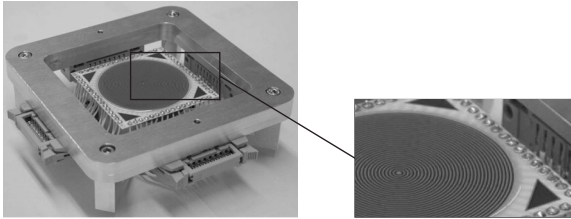
material interferometrically. The measurements were used to deduce the aspherical part of the distortion. The active surface of the compensating optic was designed respectively. The design and results of the previous simulation are presented in chapter 4.3. Figure 1 shows the schematic diagram of the first concept. The base body is heated in the middle by hot water flowing through the feed nozzle (T2) and leaving it at T3. The piston is formed by the inner part of the base body. The second water circuit between T1 and T4 insulates thermally the piston from the rest of the body.



**Figure 1:** On the left side: schematic diagram of the mirror with the two water circulation between T1-T4 and T2-T3. On the right side: plot of the measured lineare deformation of the mirror surface versus the temperatur difference between the two water circulations.

If a temperature difference  $\Delta T$  exists between the two water circuits, then the material of the piston expands towards the rest of the body and the form of the piston is impressed to the mirror substrate. The dimensions of the piston and the radial groove around it were designed that the resulting deformation of the mirror surface fits best to the aspheric part of the phase distortion. Additionally to the accordance between the form of the deformation and the phase distortion, the performance of the mirror is shown in chapter 4.3.1. An important aspect is highlighted in figure 1 on the right side. The diagram shows, that the thermal actuator (the piston) behaves in a perfect linear way independent from the water inlet pressure and therefore of the flow rate. This allows for an easy application of such a mirror in an open or closed loop optical system. Due to the insufficient compound layer an intracavity experiment is not yet possible as discussed in detail in chapter 4.3.3.

The second concept is designed to create customized modes in a thin disk laser resonator. For this it is necessary to have a very high radial resolution on the mirror surface. A circuit board with 32 central heating circuits as thermal actuators manufactured by screenprinting technology is the solution. Every single circuit acts as a thermal actuator, heating the mirror substrate material. The thermal expansion of the substrate causes the deformation of the mirror surface. The first prototype of the mirror concept is illustrated in figure 2.

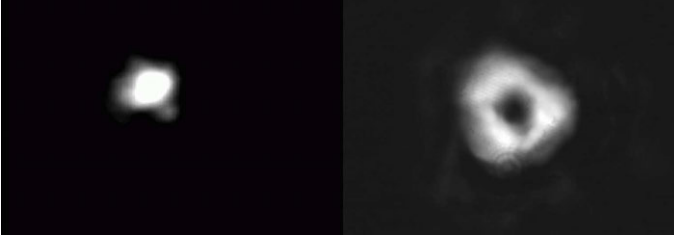


**Figure 2:** Prototype of the complete mirror based on a circuit board with 32 heating circuits. The mirror, glued on the board, is shown in detail.

Additionally a simulation model was set up for this mirror concept to qualify the influences of production tolerances and to determine the parameters, which create different deformations on the mirror surface. The result of the simulation and the comparison with the measured mirror surface were remarkable and can be seen in chapter 4.4.3.6. Furthermore the optical surface of the mirror was qualified. Due to the insufficient surface quality of the mirror surface, three different variations of the concept were built up to solve this problem. The mechanism, which induces the poor surface quality, and the detailed results of the surface measurements were analyzed and discussed in chapter 4.4.3.2.

Despite the poor surface quality, the mirror could be installed into the designed thin disk resonator. Several mirror surfaces to create customized modes were calculated with the help of the Collins-Intergral. The simulation program gives the initial parameters for the heating circuits and helps to analyse if the given resolution of the mirror is high enough to create the needed surfaces. For the first functional test a customized ring mode was chosen. Additionally to the qualification of the result by imaging the intensity distribution from the outcoupling window to a CCD-camera, the  $M^2$  and the power of the created beam has been measured. The created power distribution is shown in figure 3. The distribution could be created instantaneously or switching between the fundamental mode of the resonator and the customized mode is possible by enabling or disabling the mirror.





**Figure 3:** The left figure shows the intensity distribution with the inactive mirror. On the right the created ring mode is demonstrated.

It was thereby possible to demonstrate the overall function of this thermal mirror concept in spite of the still poor surface quality. Furthermore this result gives a rough estimate of its potential if a better surface quality is provided.

In conclusion, this thesis demonstrates, that thermal actuators have the potential to build up high-precision active optics economically without any hysteresis. Both concepts have the capability to sustain the high standing power in a thin disc resonator while compensating phase distortions or creating customized modes sufficiently. But the mounting technology has to be improved to achieve the needed flatness of the optical surfaces.

Further developments should be devoted to the studies of combining the thermal optic with a wave front detector to upgrade the active optic to an adaptive optic in closed loop operation. As long as the response time of the optical phase distortion is in the same dimension than the response time of the thermal actuator, this solution will find its way into successful products soon.

# 1 Einleitung

Im Jahr 2010 feierte der Laser seinen 50 Geburtstag. Am 16. Mai 1960 gelang es Theodore Maiman den ersten Laser, einen Rubinlaser, in Betrieb zu nehmen [1, 2]. Zu Beginn wurde der Laser als Erfindung ohne Anwendungsgebiet belächelt. Seit diesen Anfängen hat die Lasertechnik durch die Fähigkeit große Energiemengen auf kleinstem Raum zu konzentrieren, zahlreiche Gebiete erobert und spielt eine nicht mehr wegzudenkende Rolle in den Bereichen Telekommunikation, Messtechnik, Heimelektronik, Medizin und in der Materialbearbeitung im Maschinen- und Anlagenbau. Durch die sehr differenzierten Anforderungsprofile in diesen Bereichen haben sich die unterschiedlichsten Bauformen mit verschiedensten laseraktiven Medien durchgesetzt [3]. So sind ohne Halbleiterlaser (Diodenlaser) schnelle Glasfaserdatennetze und optische Speichermedien wie DVD und CD nicht denkbar. Am anderen Ende des kommerziell erhältlichen Laserspektrums sind Hochleistungsgaslaser, hauptsächlich CO<sub>2</sub>-Laser, die Zugpferde in der Lasermaterialbearbeitung. Durch Weiterentwicklungen gelingt es Hochleistungsfestkörperlasern in zunehmenden Maße in die Domäne der CO<sub>2</sub>-Laser einzubrechen [4, 5].

Neben den Faserlasern steht mit dem Scheibenlaser heute ein Lasersystem zur Verfügung, mit dem sich höchste Leistung, höchster Wirkungsgrad und gute Strahlqualität vereinen lässt. Durch die Wahl des laseraktiven Mediums als dünne Scheibe (typische Dicke 100-200  $\mu\text{m}$ ) auf einer effektiven Wärmesenke ergeben sich nur noch sehr geringe Phasenstörungen durch den thermischen Linseneffekt im Resonator. Diese sind allerdings immer noch zu groß, um Grundmodelaser im kW-Bereich mit hohem Wirkungsgrad realisieren zu können. Ursache hierfür sind die asphärischen Anteile der Wellenfrontverzerrung, die sich in klassischen sphärischen Laserresonatoren nicht kompensieren lassen [6]. Für den Grundmodebetrieb des Scheibenlasers bei höchster Leistung wird daher ein resonatorinternes optisches Element benötigt, das diese verbleibende Phasenstörung kompensiert. Dabei muss die Kompensation dynamisch erfolgen, da für jede Leistung und für jeden Strahldurchmesser andere asphärische Wellenfrontverzerrungen vorherrschen. Diese Störungen sind rotationssymmetrisch, so dass mit einem rotationssymmetrischen Element bereits eine vollständige Kompensation erreicht werden kann.

Parallel zu den Entwicklungen in der Lasertechnik gibt es in der Optik Bestrebungen, optische Abbildungssysteme dadurch zu optimieren, dass vorhandene, sich schnell ändernde Störungen bestmöglich auskorrigiert werden. Auch bei der Entwicklung von adaptiven Systemen waren die theoretischen Anforderungen an solche Optiken schon mehrere Jahrzehnte bekannt, bevor sie technisch umsetzbar waren. Erst Ende der 1970er Jahre wurde ein adaptives optisches System durch die US-Air Force in Hawaii installiert. Der kalte Krieg und die militärische Geheimhaltung verhinderten bis in die 1990er Jahre eine zivile Forschung und Nutzung der Technologie für adaptive Optiken. Nach der Aufgabe der Geheimhaltung wurden die Erkenntnisse schnell in die zivile Nutzung überführt [7]. Neben dem Haupteinsatzgebiet von adaptiven Optiken in großen Teleskopen [8] eroberten sich die adaptiven Spiegel weitere Bereiche wie die Messtechnik [9], die Medizin [10] und auf vielfältig Art und Weise die Lasertechnik. Der erste breite Einsatz adaptiver Optiken in der Lasertechnik erfolgte bei CO<sub>2</sub>-Laser-Schneidanlagen. Durch die Strahlführung über verfahrbare Bearbeitungsoptiken ändert sich die Länge des Strahlweges permanent. Daraus resultierende Änderungen der Fokusgeometrie und der Fokusslage werden durch aktiv gesteuerte Optiken auf Basis von sphärisch deformierbaren Kupferspiegeln korrigiert [11, 12].

Bei adaptiven Optiken für Lasersysteme sind mechanisch deformierbare Spiegel, die über Piezo-Stellglieder oder elektrostatisch angesteuert werden, Stand der Technik. Aufgrund der reinen mechanischen Deformation der Oberflächenmembrane und wegen der notwendigen Größe der Aktuatoren ist die laterale Auflösung stark eingeschränkt. Die Durchmesser dieser Spiegel (typisch > 20 mm) sind daher meist signifikant größer als typische resonatorinterne Laserstrahldurchmesser im nahen infrarot oder sichtbaren Wellenlängenbereich. Wenn diese Spiegel in ihrer Größe herunter skaliert werden, reduziert sich System bedingt deren Auflösung. Die hohe Auflösung ist jedoch für die komplexen, asphärischen Phasenkorrekturen bei resonatorinterner Strahlformung unabdingbar. Problematisch ist außerdem die geringe Zerstörschwelle der Membranspiegel, die mindestens eine Größenordnung unter den Werten für Hochleistungslaserspiegel liegt. Auch die in jüngerer Zeit zunehmend untersuchten Bauteile auf Flüssigkristall-Basis sind für hohe Leistungsdichten durch ihre begrenzte Reflektivität und Zerstörschwelle nicht für das Scheibenlasersystem geeignet [13]. Aus den genannten Gründen werden momentan adaptive optische Elemente für die Formung von Laserstrahlen hoher Leistungsdichte außerhalb oder innerhalb des Resonators nur sehr sporadisch eingesetzt, am ehesten noch in dem genannten Beispiel der CO<sub>2</sub>-Laser, wo die Strahldurchmesser mehrere Zenti-

meter betragen und die Leistungsdichten außerhalb des Resonators vergleichsweise gering sind.

Basierend auf den Erkenntnissen der existierenden Spiegelsysteme werden daher Konzepte für aktive optische Elemente entwickelt, die genau die restlichen Phasenstörungen im Scheibenlaser zu kompensieren vermögen. Der primäre Ansatz dazu besteht darin, die thermisch induzierten Effekte, welche die Phasenstörung verursachen, durch eine aktive Optik mit thermomechanischem Aktuator zu kompensieren.

Untersuchungen von Michel und Vodovon zeigen eindrucksvoll, dass thermisch aktivierte Optiken in der lateralen Auflösung durchaus mit gängigen Systemen mithalten können und aus wirtschaftlicher Sicht eine sehr kostengünstige Alternative darstellen [14, 15]. Durch gezielte adressierbare Wärmeeinbringung in einen Spiegel oder den Grundkörper soll diesen Spiegeln eine radialsymmetrische Kontur eingeprägt werden, die die Wellenfrontverzerrung, die im laseraktiven Medium entsteht, kompensiert. Das ist exakt das Prinzip der Phasenkonjugation, das sich für Scheibenlaser durch die Rotationssymmetrie in besonders eleganter Weise realisieren lässt.

Neben der Phasenkompensation im Scheibenlaser können diese aktiven Konzepte ohne zusätzlichen Aufwand auch dazu benutzt werden, gezielte Moden im Resonator zu erzwingen, die für bestimmte Anwendungen von Vorteil sind. So lassen sich durch Super-Gauß-Moden mit großem Exponent annähernd “top-hat” Intensitätsprofile erzeugen, die für viele Materialbearbeitungsaufgaben wünschenswert sind, um den Prozesswirkungsgrad zu steigern. Die Erzeugung von Super-Gauß-Moden mit Hilfe eines passiven “graded-phase”-Spiegels wurde in einem CO<sub>2</sub>-Laser schon 1994 von Richard van Neste gezeigt und 2004 an der Universität Bern an einem Nd:YAG-Laser für Festkörperlaser nachvollzogen [16, 17]. 2006 wurde von Gerber in Bern der passive Spiegel durch ein aktives Element im Resonator ersetzt und dadurch die Möglichkeit demonstriert, unterschiedliche maßgeschneiderte Moden in einem Resonator zu erzeugen [18].

Ziel dieser Arbeit ist es, Konzepte thermisch aktiver Optiken für den resonatorinternen Einsatz im Scheibenlaser zu entwickeln, welche einerseits die verbleibenden asphärischen Phasendeformationen kompensieren und zum Anderen die Möglichkeit bieten, maßgeschneiderte Moden im Scheibenlaserresonator zu erzeugen.

Hierfür werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen betrachtet. Dabei wird neben den Methoden zur Berechnung der Laserstrahlpropagation auf das Scheiben-

laserkonzept eingegangen und die in dieser Arbeit verwendeten optischen Messmethoden vorgestellt.

Im Kapitel 3 werden die Begriffe adaptive und aktive Optik behandelt. Die Bauarten und Einsatzgebiete werden eingeführt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Übersicht einsetzbarer Aktuatorkonzepte.

Die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte für thermisch aktive Spiegel sind Gegenstand des vierten Kapitels. Zu Beginn des Kapitels wird auf die Ziele und die Randbedingungen eingegangen, welche für die Entwicklung der Konzept ausschlaggebend sind. Im Anschluss daran wird das entwickelte Simulationsprogramm beschrieben. Die beiden darauf folgenden Abschnitte sind den beiden thermisch aktiven Spiegelkonzepten gewidmet. Für jedes Spiegelkonzept getrennt werden detailliert auf das Simulationsmodell eingegangen und die Auswirkungen bestehender Fertigungstoleranzen mittels Parameterstudien überprüft. Der Charakterisierung der beiden Konzepte wird in den beiden folgenden Abschnitten ein breiter Raum eingeräumt. Von Interesse sind dabei die Eigenschaften der Spiegel in Bezug auf Oberflächenqualität, Funktions- und Einsatzfähigkeit im Scheibenlaserresonator. Die beiden Abschnitte der jeweiligen Konzepte werden mit einem Vergleich der Experimente mit den vorgenommenen Simulationen und einer Zusammenfassung der Ergebnisse abgeschlossen.

Der Einsatz eines der beiden Konzepte zur Erzeugung sogenannter maßgeschneiderter Moden in einem Scheibenlaserresonator wird in Kapitel 5 präsentiert. Hierfür werden der Resonatoraufbau vorgestellt und auf Basis dieser Auslegung mit Hilfe des Collins-Integrals die benötigten Spiegeloberflächen für mehrere Moden berechnet. Nach der Simulation der Spiegeloberfläche wird diese am realen Spiegel nachvollzogen, vermessen und im Resonatorbetrieb überprüft. Beendet wird diese Arbeit mit einer Zusammenfassung in Kapitel 6.

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

### Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen  
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

### Gorriz, Michael

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

### Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO<sub>2</sub>-Laserschneiden von Metallen  
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

### Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen  
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

### Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern  
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

### Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO<sub>2</sub>-Laser  
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

### Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung  
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

### Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr  
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

### Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO<sub>2</sub>-Lasern  
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

### Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr  
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

### Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern  
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

### Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern  
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

### Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität  
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

### Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß  
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

### Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens  
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

### Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

### Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen  
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

### Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser  
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

### Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Lasern  
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

### Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen  
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

### Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen  
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

### Rapp, Jürgen

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

**Wittig, Klaus**

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung  
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

**Grünenwald, Bernd**

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

**Lee, Jae-Hoon**

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung  
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

**Albinus, Uwe N. W.**

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren  
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

**Wiedmaier, Matthias**

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren  
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

**Bloehs, Wolfgang**

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

**Bea, Martin**

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

**Stöhr, Michael**

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden  
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

**Plaß, Wilfried**

Zerstörschwellen und Degradation von CO<sub>2</sub>-Laseroptiken  
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

**Schaller, Markus K. R.**

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän  
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

**Hack, Rüdiger**

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW  
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

**Krupka, René**

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser  
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

**Pfeiffer, Wolfgang**

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

**Volz, Robert**

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern  
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

**Bartelt-Berger, Lars**

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

**Müller-Hummel, Peter**

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspansung  
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

**Rohde, Hansjörg**

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser  
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

**Huonker, Martin**

Strahlführung in CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung  
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

**Callies, Gert**

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen  
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

**Schubert, Michael E.**

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

**Kern, Markus**

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen  
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

**Raiber, Armin**

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken  
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

### **Schittenhelm, Henrik**

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

### **Stewen, Christian**

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung  
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

### **Schmitz, Christian**

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen  
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

### **Karszewski, Martin**

Scheibenlaser höchster Strahlqualität  
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

### **Chang, Chin-Lung**

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik  
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

### **Haag, Matthias**

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern  
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

### **Bahn Müller, Jochen**

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

### **Schellhorn, Martin Carl Johannes**

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

### **Angstenberger, Birgit**

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

### **Bachhofer, Andreas**

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau  
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

### **Breitschwerdt, Sven**

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen  
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

### **Mochmann, Gunter**

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren  
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

### **Herrmann, Andreas**

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötlens mit Diodenlasern  
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

### **Mästle, Rüdiger**

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung  
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

### **Voß, Andreas**

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG  
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

### **Müller, Matthias G.**

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung  
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

### **Abeln, Tobias**

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl  
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

### **Erhard, Steffen**

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser  
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

### **Contag, Karsten**

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers  
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

### **Krastel, Klaus**

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen  
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

### **Staud, Jürgen**

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

### **Schinzl, Cornelius M.**

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

### **Sebastian, Michael**

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen  
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X



**Lücke, Bernd**

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays  
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

**Hohenberger, Bernd**

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-  
technik – Steigerung von Prozesssicherheit, Fle-  
xibilität und verfügbarer Strahlleistung  
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

**Jasper, Knut**

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und  
-führung für die Mikrotechnik  
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

**Heimerdinger, Christoph**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen  
für die Luftfahrt  
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

**Christoph Fleig**

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen  
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer  
Komponenten  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

**Joachim Radtke**

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-  
ramischen Werkstoffen mittels repetierender  
Laserbearbeitung  
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

**Michael Brandner**

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und  
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern  
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

**Reinhard Winkler**

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von  
Aluminium-Druckguss  
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

**Helmut Kindler**

Optische und gerätetechnische Entwicklungen  
zum Laserstrahlspritzen  
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

**Andreas Ruf**

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-  
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern  
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

**Guido Hergenhan**

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

**Klaus Goth**

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-  
umguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-Laser  
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

**Armin Strauch**

Effiziente Lösung des inversen Problems beim  
Laserstrahlschweißen durch Simulation und  
Experiment  
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

**Thomas Wawra**

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-  
sion mittels Laserstrahlung  
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

**Michael Honer**

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren  
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung  
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

**Thomas Herzinger**

Prozessüberwachung beim Laserbohren von  
Turbinenschaufeln  
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

**Reiner Heigl**

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-  
gusslegierungen mittels Laserstrahlung  
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. 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 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 Nahteigen-schaften 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 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

### **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 Leistungskalierung  
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 Getriebe-  
bau – 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