

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

C. Neugebauer
Thermisch aktive optische Bauelemente
für den resonatorinternen Einsatz beim
Scheibenlaser

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

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

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

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Liste der verwendeten Symbole	9
Extended Abstract	11
1 Einleitung	15
2 Grundlagen	19
2.1 Propagation von Strahlungsfeldern	19
2.2 Scheibenlaser	24
2.3 Optische und thermische Messmethoden	27
3 Adaptive Optiken	33
3.1 Bauarten und Einsatzgebiete adaptiver Optiken	34
3.2 Aktuatoren für aktive Spiegel	36
4 Radialsymmetrische thermisch aktive Optiken	39
4.1 Zielsetzung und Rahmenbedingungen	39
4.2 Simulation	41
4.3 Stufenspiegel	42
4.4 Elektro-thermischer Heizkreisspiegel	65
5 Erzeugung definierter Resonatormoden mittels aktiver Optik	91
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
6 Zusammenfassung und Ausblick	107
Literaturverzeichnis	111

Liste der verwendeten Symbole

Die folgende Auflistung beinhaltet die wichtigsten verwendeten Variablen, Symbole und Abkürzungen. Alle weiteren auftretenden Symbole sind an entsprechender Stelle im Text hinreichend erläutert.

Symbol	Bedeutung	Einheit
Lateinische Buchstaben		
A, B, C, D	Elemente der ABCD-Matrizen	, m, 1/m,
C_p	spezifische Wärmekapazität	J/(K·kg)
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
d_0	Fokusbildungsdurchmesser	m
d_{kr}	Kristalldicke des LAM	m
$E(r)$	radialsymmetrische elektrische Feldverteilung	
f	Frequenz	Hz
H	Höhe	m
$I(x, y, z)$	Intensitätsverteilung	W/m ²
k_B	Boltzmann-Konstante	J/K
L	Länge, Propagationsstrecke	m
L_{opt}	optische Weglänge	m
M	Matrizen	
M^2	Beugungsmaßzahl	
N_A	numerische Apertur	
n	Brechungsindex	
P	Laserleistung	W
q	komplexer Strahlparameter	
r	Radius	m
s	Schnittachsenkoordinate	m
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
w	Strahlradius	m
x	x Koordinate	m
y	y Koordinate	m

Symbol	Bedeutung	Einheit
z	Propagationsrichtung, z Koordinate	m
z_R	Rayleighlänge	m
z_0	Fokusposition	m

Griechische Buchstaben

$\alpha(T)$	linearer Ausdehnungskoeffizient	1/K
β	Kippwinkel	rad
γ	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
ε	Emissionskoeffizient	
ϑ	Divergenzhalfwinkel	rad
λ	Wellenlänge	m
ω	Kreisfrequenz	Hz
$\omega(z)$	Laserstrahlradius	m
$\omega_0(z)$	Grundmodestrahlradius	m
$\Phi(r)$	Phasenfront	
Θ	Divergenzvollwinkel	rad

Abkürzung Bedeutung

LAM	Laseraktives Medium
AR	nicht reflektierend (anti reflective)
HR	hoch reflektierend (high reflektive)
Yb:YAG	Ytterbium dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
o.E.	ohne Einheit
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CCD	Charge-Couple Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DVD	Digital Versatile (Video) Disc
CD	Compact Disc
OPD	Optical Path Difference
OWL	Overwhelmingly Large Telescope
SSP	Strahlparameterprodukt

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-Intregal [23], which calculates the phase and intensity distribution of an electromagnetic wave propagain 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