

# **Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen**

von Dr.-Ing. Martin Stubenvoll  
Universität Stuttgart



utzverlag München

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

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf  
Mitberichter: apl. Prof. Dr. rer. nat. Alexander Egner  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny

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., 2019

D 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2019

ISBN 978-3-8316-4819-1

Printed in Germany

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>7</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>8</b>
<b>Kurzfassung der Arbeit</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	17
1.2 Aufbau der Arbeit.....	18
<b>2 Thermisch induzierte Aberrationen</b>	<b>21</b>
2.1 Grundlegende Effekte.....	21
2.1.1 Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex.....	22
2.1.2 Thermische Expansion.....	24
2.1.3 Thermisch induzierte Spannungen.....	25
2.2 Thermo-optische Effekte in optischen Elementen.....	26
2.2.1 Analytische Näherung.....	27
2.2.2 Simulationsmethodik.....	29
<b>3 Photothermische Absorptionsmessung</b>	<b>33</b>
3.1 Absorptionsmessung an optischen Elementen: Stand der Technik.....	33
3.2 Wellenfrontmessung mit gekreuzten Heiz- und Teststrahlen.....	38
3.3 Simultane Oberflächen- und Volumenabsorptionsbestimmung.....	42
3.4 Absorptionsbestimmung an nichtlinearen Kristallen.....	44
3.4.1 Aufbau und Messung.....	44
3.4.2 Simulation anisotroper Kristalle.....	46
3.4.3 Auswertung.....	47

3.4.4	Ergebnisse .....	49
3.4.5	Fazit.....	53
<b>4</b>	<b>Passive Kompensation thermisch induzierter optischer Effekte</b>	<b>55</b>
4.1	Methoden der Kompensation: Stand der Technik .....	55
4.1.1	Aktive Kompensation.....	55
4.1.2	Passive Kompensation .....	56
4.2	Theoretische Überlegungen zur passiven Kompensation.....	57
4.2.1	Passive Kompensation des Tailenlagenshifts .....	57
4.2.2	Passive Kompensation von Aberrationen höherer Ordnung.....	60
4.3	Passive Kompensation des Tailenlagenshifts.....	66
4.3.1	Kompensationseignung von Elementen mit negativem $dn/dT$ .....	66
4.3.2	Überprüfung der Kompensation mit Strahlkaustikmessungen .....	70
4.4	Passive Kompensation von Aberrationen höherer Ordnung .....	72
4.4.1	Simulation und Auslegung.....	72
4.4.2	Experimentelle Untersuchung.....	78
4.4.2.1	Direkte Wellenfrontmessungen am F-Theta-Objektiv .....	79
4.4.2.2	Überprüfung der Kompensation mit Kaustikmessungen .....	82
4.5	Fazit .....	84
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung der Arbeit</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Simulationsparameter für KTP und BBO</b>	<b>91</b>
<b>B</b>	<b>Materialparameter für BK7, N-PK51 und Quarzglas</b>	<b>93</b>
	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	<b>95</b>
	<b>Publikationsliste</b>	<b>105</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>107</b>

# Kurzfassung der Arbeit

Die kommerzielle Verfügbarkeit von Festkörperlasern mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlung bei hoher Leistung (d.h. hoher Brillanz) birgt großes Potenzial für industrielle Anwendungen. Eine Steigerung der Brillanz ermöglicht einerseits eine Produktivitätssteigerung durch höhere Prozessgeschwindigkeiten und andererseits die Erschließung und Verbesserung neuer Laserverfahren wie z.B. das Remote-Schweißen oder die Generative Fertigung. Die wirtschaftlichen Vorteile des Einsatzes solcher Laserstrahlquellen sind der Antrieb permanenter Entwicklungsbestrebungen, um zu höheren (mittleren und/oder Spitzen-)Leistungen bei sehr guter Fokussierbarkeit zu gelangen. Das volle Potenzial hoher Laserleistung bei hervorragender Fokussierbarkeit kann jedoch nur ausgeschöpft werden, wenn die zur Strahlführung und -formung eingesetzten optischen Elemente nur eine minimale Absorption der Laserstrahlung aufweisen und auf diese Weise vernachlässigbare thermisch induzierte Aberrationen hervorrufen, so dass die Strahlqualität auf dem Weg von der Strahlquelle zur Wechselwirkungszone erhalten bleibt.

Voraussetzung für ein aberrationsarmes Optikdesign sind zum einen optische Materialien mit niedriger Absorption und zum anderen eine gute Kenntnis der Absorptionswerte der eingesetzten Substrate und Vergütungsschichten. Vor allem in Fällen, in denen keine eindeutigen Herstellerangaben oder Literaturwerte vorliegen, können Absorptionsmessungen hierbei die benötigten Informationen liefern und die Entwicklung komplexer Optiken wesentlich unterstützen. In dieser Arbeit wird daher ein am Laserlaboratorium Göttingen entwickeltes photothermisches Messverfahren erweitert, das die Bestimmung von Schicht- bzw. Oberflächen- und Volumenabsorption aus einer einzigen Messung an einer Quaderprobe ermöglicht. Durch Modifikationen des Aufbaus, der Kalibrierung anhand von numerischen Berechnungen sowie der Auswertungsmethodik wird die Anwendbarkeit dieses Verfahrens von relativ großen, isotropen Glasproben ausgeweitet auf anisotrope Materialien und relativ kleine Quaderproben (laterale Dimension ca. drei- bis vierfacher Strahldurchmesser). Anhand von Messungen an zwei verschiedenen optisch nichtlinearen Kristallen (KTP, BBO) wird die Eignung des angepassten Verfahrens demonstriert.

Neben der Messung der Absorption ist ebenso die quantitative Betrachtung der daraus resultierenden thermo-optischen Aberrationen von erheblicher praktischer Relevanz. Beim Einsatz von Hochleistungslasern im Umfeld der industriellen Fertigung können durch thermisch induzierte Verschiebungen der Strahltaile unerwünschte Prozessinstabilitäten verursacht werden. Ist eine ausreichende Vermeidung der Absorption als Ursache der thermo-optischen Effekte nicht möglich, bilden geeignete Kompensationsmethoden eine Möglichkeit, um die erforderlichen Prozessparameter zu gewährleisten. Hierzu werden in dieser Arbeit Untersuchungen eines Verfahrens zur passiven Kompensation thermisch induzierter Effekte gezeigt. Zunächst wurde eine Kompensation des thermisch induzierten Taillenlagenshifts mit einem einfachen, planparallelen Kompensationselement entwickelt und die Tauglichkeit durch Messungen nachgewiesen. Schließlich wurde mit dem Ziel der Vermeidung inhärenter Einschränkungen und Nachteile dieser einfachen Methode ein darauf aufbauendes Konzept einer umfassenderen passiven Kompensation thermo-optischer Effekte mit einem mehrstufigen, planparallelen Kompensationselement entwickelt. Dessen Eignung zur passiven Kompensation von Aberrationen höherer Ordnung wurde mit Simulationen und Experimenten untersucht und nachgewiesen.

## Extended Abstract

In order to increase the efficiency of industrial laser-based manufacturing processes, but also to broaden the field of application for scientific laser applications, it is desirable that average powers and/or pulse energies as well as beam quality be further increased. However, with any advancement in laser development leading to higher brilliance, the performance of beamline optics requires careful consideration. The advantages of high-power lasers with beam qualities close to the diffraction limit can only be fully exploited when the optical elements which guide and shape the beam exhibit negligible amounts of thermally induced effects.

In order to design low-aberration optics for high-power laser applications, it is thus necessary to gain knowledge about the absorption properties of the employed optical materials. While for many standard materials volume absorption values are available from datasheets, it may sometimes be necessary to individually measure the absorption characteristics of optical materials. With respect to characterizing coating/surface absorptions it is all the more inevitable to carry out particular measurements in many cases. Alongside a number of existing measurement techniques at disposal, each one with their inherent advantages and drawbacks, a crossed-beam photothermal method has been developed at Laser-Laboratorium Göttingen which allows for comparatively short measurement times and a simultaneous but separate acquisition of bulk and surface absorptions. One of the drawbacks of this technique has been so far its limited applicability to large, isotropic glass samples. In order to extend its field of application, further development has been made to enable absorption measurements of anisotropic crystal samples with small dimensions relative to their thermal diffusion length. To this end, the measurement setup, the calibration procedure by means of numerical simulations as well as the evaluation procedure were modified, enhanced and adapted to the conditions of small anisotropic samples. The suitability of the improved technique was verified by investigating absorptions of KTP and BBO crystal samples. With this technique, the effect of annealing on the relaxation of irradiation-induced structural damages ("*gray-tracking*") in KTP and their effect on bulk absorption could be shown. For BBO, a wavelength-dependent study of bulk absorption in the NIR range was made, comparing the results of the enhanced photothermal method to literature values.

Besides the quantification of absorption properties of laser optics it may, furthermore, also prove necessary to control their consequences on functionality. Residual absorptions in laser optics lead to an increase of the temperature and consequently to thermo-optic effects, which in turn partly or fully obliterate the intrinsic advantages of a high-brilliance laser beam. The most prominent effect in this regard is the thermally induced focal shift, which leads to a displacement of the beam waist along the beam axis. However, the entirety of thermo-optic effects is much more complex, comprising not only focal shifts but also higher-order aberrations, which deteriorate the focusability and therefore affect process parameters. If, for any laser application, thermo-optic effects do not range within the required parameter window, compensation approaches may become of interest.

Among all conceivable compensation schemes, actively controlled adaptive optics offer the greatest flexibility. By means of e.g. adaptive mirrors, highly flexible and dynamic correction of aberrations up to higher orders is possible. However, active compensation techniques generally require additional electronic equipment, such as beam monitoring devices, control units, and actuators. Thus, in order to establish an active compensation of thermo-optic effects, a large amount of complexity must be introduced to the optical system. However, in terms of cost and reliability, but also with respect to the aptitude for easy retrofitting, this may be undesirable, particularly for industrial applications.

As an auspicious alternative to expensive and elaborate active compensation systems, passive compensation approaches may be taken into consideration. Through the utilization of optical materials with a negative temperature coefficient of the refractive index ( $dn/dT$ ), compensation systems can be designed, exploiting the thermo-optic behaviour of these materials to counteract the thermally induced effects of the actual optical system. In this work, the development of a passive compensation technique for a high-power NIR focusing optics for material processing purposes is demonstrated. As a first step, the thermo-optic behaviour of different optical materials was characterized by means of Hartmann-Shack wavefront measurements with the objective of assessing their potential for passive compensation. Subsequently, a reduction of the thermally induced focal shift of an F-Theta lens was shown by measurements of the beam caustic, using a single plane optical Schott N-PK51 element.

With the knowledge of the limitations and shortcomings of the above straightforward one-element approach gained from the experiments, a more sophisticated passive compensation scheme was developed. Aiming at passive compensation of higher-order aberrations, theoretical considerations were made about the elimination of aberrations



with a multi-stage layout and counterbalancing stress-birefringence by exploiting polarization effects. Through the use of various consecutive compensating elements of different materials, the number of degrees of freedom for an optimized compensation of wavefront deformations was increased. The enhanced layout was simulated and optimized numerically. It was demonstrated that an effective passive compensation of higher-order aberrations is possible and the effects of stress-birefringence can be levelled out by distributing the compensating mechanism over two symmetric sections and rotating the polarization of the laser beam by  $90^\circ$  in between, thus achieving a polarization-neutral compensation. Based on the numerical results, an experimental setup was designed and fabricated. The efficacy of the compensation of astigmatism through stress-birefringence was verified by means of wavefront measurements. Beam caustic measurements complemented the findings, proving a passive compensation of the focal shift and higher-order aberrations.

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

### **Thomas Fuhrich**

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

### **Daniel Müller**

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

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

### **Jiancun Gao**

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

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

### **Wolfgang Gref**

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

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

### **Michael Weikert**

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

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

### **Julian Sigel**

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit vari-ablem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

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 Breiting**

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

### **Dmitrij Walter**

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

### **Jan-Philipp Weberpals**

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

### **Angelika Beyertt**

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

**Christian Stolzenburg**

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich  
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

**Svent-Simon Beyertt**

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern  
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

**Sonja Kittel**

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen  
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

**Andrey Andreev**

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebekonstruktion – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte  
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

**Christian Föhl**

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen  
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

**Andreas Josef Birnesser**

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen  
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

**Christoph Neugebauer**

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser  
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

**Andreas Dauner**

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren  
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

**Axel Heß**

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit  
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

**Christian Gehrke**

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen  
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

**David Schindhelm**

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen  
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

**Moritz Vogel**

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery  
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

**Andreas Michalowski**

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen  
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

**Georg Stöppler**

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie  
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

**Patrick Mucha**

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK  
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

**Claus-Dieter Reiniger**

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt  
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

**Andreas Leitz**

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung  
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

**Peter Stritt**

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrisen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016  
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

**Katrin Sarah Wentsch**

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen  
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

**Jan-Philipp Negel**

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich  
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

**Christian Freitag**

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe  
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

**Andreas Popp**

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen  
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

**Karin Heller**

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung  
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

**Stefan Piehler**

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern  
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

**Felix Abt**

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen  
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

**Volker Rominger**

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz  
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

**Thomas Rataj**

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen  
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0

**Michael Diez**

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium  
2018, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4737-8

**Andreas Heider**

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm  
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

**Marcel Schäfer**

Energetische Beeinflussung von Schmelzefluss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl  
2018, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-4742-2

## Laser in der Materialbearbeitung

### Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

**Tom Dietrich**

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern  
2019, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4785-9

**Martin Rumpel**

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers  
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4801-6

**Michael Eckerle**

Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams  
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4804-7

**Martin Stubenvoll**

Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen  
2019, 118 Seiten, ISBN 978-3-8316-4819-1