



Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge



## LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Stefan Piehler

### **Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern**

Herbert Utz Verlag 



Stefan Piehler

**Resonatorinterne Kompensation thermisch  
induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten  
Scheibenlasern**

Herbert Utz Verlag · München 2017

Laser in der Materialbearbeitung  
Band 87

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7349-0 Version: 1 vom 19.12.2017  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4690-6  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2017





Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

S. Piehler  
Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen  
in hochbrillanten Scheibenlasern

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. 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.



# **Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern**

von Dr.-Ing. Stefan Pihler  
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. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Alois Herkommer

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., 2017

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 2017

ISBN 978-3-8316-4690-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

# Inhalt

<b>Inhalt</b>	<b>5</b>
<b>Liste der verwendeten Symbole</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>13</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>21</b>
1.1 Skalierungsproblematik bei hochbrillanten Scheibenlasern . . . . .	21
1.2 Deformierbare Spiegel für den resonatorinternen Einsatz . . . . .	26
1.3 Ziele und Aufbau der Arbeit . . . . .	29
<b>2 Grundlagen</b>	<b>31</b>
2.1 Thermische Effekte im Scheibenlaserkristall . . . . .	31
2.2 Wellenfrontstörungen im Scheibenlaserkristall . . . . .	36
2.3 Methoden zur Resonatormodellierung . . . . .	42
2.4 Auswirkung resonatorinterner Wellenfrontstörungen . . . . .	46
2.4.1 Sphärische Wellenfrontstörungen . . . . .	47
2.4.2 Asphärische Wellenfrontstörungen . . . . .	49
<b>3 Resonatorinterne Kompensation von Wellenfrontstörungen</b>	<b>53</b>
3.1 Kompensation sphärischer Wellenfrontstörungen . . . . .	54
3.2 Kompensation asphärischer Wellenfrontstörungen . . . . .	56
<b>4 Flächenlastspiegel für den resonatorinternen Einsatz</b>	<b>63</b>
4.1 Flächenlastspiegel - Grundprinzip und Auslegung . . . . .	63
4.2 Sphärische Flächenlastspiegel . . . . .	67
4.2.1 Auslegung . . . . .	68
4.2.1.1 Sphärische Flächenlastspiegel homogener Dicke . . . . .	68
4.2.1.2 Sphärische Flächenlastspiegel mit optimierter Di- ckenverteilung . . . . .	70
4.2.2 Charakterisierung . . . . .	74
4.2.2.1 Sphärische Flächenlastspiegel mit homogener Dicke . . . . .	76

---

4.2.2.2	Sphärische Flächenlastspiegel mit optimierter Dickenverteilung . . . . .	80
4.3	Asphärische Flächenlastspiegel . . . . .	86
4.3.1	Auslegung . . . . .	86
4.3.2	Charakterisierung . . . . .	91
<b>5</b>	<b>Experimentelle Demonstration der resonatorinternen Störungskompensation</b> . . . . .	<b>96</b>
5.1	Sphärische Kompensation . . . . .	97
5.2	Asphärische Kompensation . . . . .	106
5.3	Kombinierte sphärische und asphärische Kompensation . . . . .	114
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	<b>123</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>129</b>
	<b>Danksagung</b> . . . . .	<b>136</b>

# Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
$a$	Plattenradius	$m$
$A$	Feldamplitude	$W/m$
$A_1$	Komponente einer Strahltransfermatrix	
$B_1$	Komponente einer Strahltransfermatrix	
$c_0$	Polynomkoeffizient	
$c_1$	Polynomkoeffizient	
$c_2$	Polynomkoeffizient	
$c_3$	Polynomkoeffizient	
$c_4$	Polynomkoeffizient	
$C_1$	Komponente einer Strahltransfermatrix	
$d_0$	Kristalldicke	$m$
$d_{00,L}$	Durchmesser der Grundmode an beliebiger Stelle $z_L$ im Resonator	$m$
$dn/dT$	Thermooptischer Koeffizient	$1/K$
$D_1$	Komponente einer Strahltransfermatrix	
$D_g$	Vorgegebene Brechkraft	$1/m$
$r$	Radiale Koordinate	$m$
$w_{Pump}$	Pumpfleckradius	$m$
$c_{SG}$	Supergauß-Exponent	
$d_P$	Pumpfleckdurchmesser	$m$
dpt	Dioptrie ( $1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$ )	$1/m$
$D$	Brechkraft	$1/m$
$D_{Disk}$	Effektive Brechkraft der Scheibe	$1/m$
$D_S$	Brechkraft eines sphärischen Aberrators	$1/m$
$D_x$	Brechkraft in x-Richtung	$1/m$
$D_y$	Brechkraft in y-Richtung	$1/m$
$D^*$	Thermisch induzierte Brechkraft pro Leistung	$W/m$

$E$	Elastizitätsmodul	$N/mm^2$
$E_0$	Feldverteilung	$V/m$
$E_{Mode}$	Feldverteilung der Resonatormode	$V/m$
$E_i$	Feldverteilung der i-ten Mode	$V/m$
$f$	Brennweite	$m$
$F_0$	Biegesteifigkeit	$Nm$
$F_{opt}(r)$	Optimierte Biegesteifigkeitsverteilung	$Nm$
$F(r)$	Lokale Biegesteifigkeit	$Nm$
$g_1$	Resonatorparameter	
$g_2$	Resonatorparameter	
$g_1 g_2, soll$	Vorgegebener Betriebspunkt bzw. Resonatorstabilität	
$h$	Plattendicke	$m$
$h(r)$	Dickenverteilung	$m$
$h_{rs}$	Reststegdicke	$m$
$h_{SG}$	Stufenhöhe der Supergauß-Verteilung	$m$
$\hbar$	Planck'sches Wirkungsquantum ( $\approx 6,626 \cdot 10^{-34} Js$ )	$Js$
$i$	Imaginäre Einheit	
$I$	Leistungsdichte bzw. Intensität	$W/m^2$
$I_0$	Spitzenintensität	$W/m^2$
$K$	Propagationsmatrix	
$K_1$	Propagationsmatrix des 1. Elements	
$K_2$	Propagationsmatrix des 2. Elements	
$K_n$	Propagationsmatrix des n. Elements	
$\tilde{L}$	Effektive Resonatorlänge	$m$
$L_{0,Kristall}$	Geometrische Länge bei Durchgang durch Kristall (homogene Temperaturverteilung)	$m$
$L_1$	Länge im Resonator	$m$
$L_2$	Länge im Resonator	$m$
$L_3$	Länge im Resonator	$m$
$L_{Kristall}$	Geometrische Länge bei Durchgang durch Kristall	$m$
$M^2$	Beugungsmaßzahl	
$M_x^2$	Beugungsmaßzahl in x-Richtung	
$M_y^2$	Beugungsmaßzahl in y-Richtung	

$M_R^2$	Geometrisch gemittelte Beugungsmaßzahl	
$M_1$	Strahltransfermatrix	
$M_2$	Strahltransfermatrix	
$M_3$	Strahltransfermatrix	
$M_K$	Strahltransfermatrix eines sphärischen Kompensators	
$M_S$	Strahltransfermatrix eines sphärischen Aberrators	
$M_r$	Radiales Biegemoment	$Nm$
$M_t$	Tangentiales Biegemoment	$Nm$
$n_0$	Brechungsindex des Kristallmaterials bei homogener Temperatur	
$n_{Kristall}$	Brechungsindex des Kristallmaterials	
$n_{Luft}$	Brechungsindex Luft	
$N_F$	Fresnelzahl	
$OPD$	Optische Pfadlängendifferenz	$m$
$OPD_{Fit}$	Fitfunktion zur Anpassung an gemessene OPD	$m$
$OPD_{Kristall}$	OPD bei Durchgang durch Kristall	$m$
$OPD_{Luft}$	OPD durch aufsteigende warme Luft vor der Scheibe	$m$
$OPD_{RS}$	OPD aufgrund der Verschiebung der Kristallrückseite	$m$
$OPL$	Optische Pfadlänge	$m$
$OPL_0$	Optische Pfadlänge im ungepumpten Laserkristall	$m$
$p$	Flächenlast	$N/mm^2$
$p_g$	Vorgegebener Druck	$N/mm^2$
$P_h$	Heizleistung	$W$
$P_{Pump}$	Pumpleistung	$W$
$q$	Komplexer q-Parameter	$m$
$r_a$	Nutaußenradius	$m$
$r_i$	Nutinnenradius	
$r_{max}$	Nutzbarer Radius	$m$
$r_t$	Radiale Koordinate des Sphärisch/asphärischen Übergangs	$m$
$R$	Krümmungsradius	$m$
$R_{0,Disk}$	Effektiver Krümmungsradius der Scheibe	$m$

$R_{Disk}$	Krümmungsradius der ungepumpten Scheibe	$m$
$R_{Disk,g182}$	Krümmungsradius der Scheibe am Rand des Stabilitätsbereichs	$m$
$R_g$	Vorgegebener Krümmungsradius	$m$
$R_k$	Kantenverrundung	$m$
$R_x$	Krümmungsradius in x-Richtung	$m$
$R_y$	Krümmungsradius in y-Richtung	$m$
$S$	Optischer Pfad	$m$
$T$	Temperatur	$K$
$T$	Strahltransfermatrix für einfachen Durchgang durch Resonator	
$T$	Transmissionsgrad	
$T_0$	Kristalltemperatur im ungepumpten Zustand	$K$
$T_{Luft}$	Temperatur der Umgebungsluft	$K$
$U$	Umlaufmatrix	
$V_B$	Beugungsverluste	
$w_{00}$	Strahlradius der Grundmode	$m$
$w_{00,D}$	Strahlradius der Grundmode auf der Scheibe	$m$
$w_a$	asphärische Komponente der Verformung	$m$
$w_g$	Vorgegebene Verformungskurve	$m$
$w_{max}$	Deformationshöhe im Zentrum	$m$
$w_{Mess}$	Gemessene Oberflächendeformation	$m$
$w_{MM}$	Strahlradis eines Multimodestrahl	$m$
$w_p$	Parabolischer Anteil der Verformung	$m$
$w_{SG}$	Radius der Supergauß-Verteilung	$m$
$w_{soll}$	Vorgegebene Sollverformungskurve	$m$
$w(r)$	Lokale Verformung	$m$
$x$	Raumkoordinate	$m$
$x_0$	Mittelpunkt bzgl. der x-Achse	$m$
$y$	Raumkoordinate	$m$
$y_0$	Mittelpunkt bzgl. der y-Achse	$m$
$z_{RS}$	Rückseitenverschiebung	$m$
$z$	Raumkoordinate	$m$
$z_0$	Rückseitenlage	$m$