



Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge



## LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Tom Dietrich

### **Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern**

utzverlag





Tom Dietrich

**Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in  
Hochleistungsscheibenlasern**

Laser in der Materialbearbeitung  
Band 94

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7453-4 Version: 1 vom 14.06.2019  
Copyright© utzverlag 2019

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4785-9  
Copyright© utzverlag 2019

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

T. Dietrich  
Gitterwellenleiterstrukturen zur  
Strahlformung in  
Hochleistungsscheibenlasern

# **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.

# **Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern**

von Dr.-Ing. Tom Dietrich  
Universität Stuttgart



München

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

Hauptberichter: Prof. Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. 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., 2019

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 © utzverlag GmbH 2019

ISBN 978-3-8316-4785-9

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>Liste der verwendeten Symbole</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>10</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>16</b>
1.1 Motivation und Ziel . . . . .	16
1.2 Struktur der Arbeit . . . . .	20
<b>2 Optische Elemente zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern</b>	<b>21</b>
2.1 Stabilisierung und Selektion der Wellenlänge und der Polarisation im Scheibenlaser . . . . .	21
2.2 Gitterwellenleiterspiegel . . . . .	23
2.2.1 Resonant-Reflection GWS . . . . .	25
2.2.2 Resonant-Diffraction GWS . . . . .	29
2.2.3 Leaky-Mode GWS . . . . .	32
<b>3 Resonatorinterne Frequenzverdopplung</b>	<b>35</b>
3.1 Überblick und Zielsetzung . . . . .	35
3.2 Auslegung und optische Eigenschaften des eingesetzten GWS . . . .	37
3.3 Multimodebetrieb des bei 940 nm gepumpten Lasers . . . . .	42
3.4 Multimodebetrieb des bei 969 nm gepumpten Lasers . . . . .	54
3.5 Grundmodebetrieb des bei 969 nm gepumpten Lasers . . . . .	61
3.6 Zusammenfassung . . . . .	73
<b>4 Resonatorinterne Erzeugung radial polarisierter Laserstrahlung</b>	<b>74</b>
4.1 Überblick und Zielsetzung . . . . .	74
4.2 Auslegung und optische Eigenschaften des eingesetzten GWS . . . .	76
4.3 Experimenteller Aufbau . . . . .	80
4.4 Betrieb des bei 969 nm gepumpten Lasers . . . . .	83

---

4.5	GWS als Auskoppelspiegel . . . . .	87
4.6	Zusammenfassung . . . . .	91
<b>5</b>	<b>Strahllagestabilisierung im Scheibenlaser</b>	<b>92</b>
5.1	Thermisch induzierte Wellenfrontstörungen im Scheibenlaser . . . . .	92
5.2	Thermisch induzierte Konvektion . . . . .	94
5.3	Strahllagestabilisierung mittels resonatorintern eingesetztem GWS . . . . .	99
5.4	Auslegung und optische Eigenschaften des eingesetzten GWS . . . . .	103
5.5	Experimenteller Aufbau . . . . .	103
5.6	Betrieb des bei 969 nm gepumpten Lasers . . . . .	105
5.7	Betrieb des bei 940 nm gepumpten Lasers . . . . .	116
5.8	Zusammenfassung . . . . .	126
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>128</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>132</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>143</b>

# Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	Wert	Einheit
<b>Lateinische Buchstaben</b>			
$c$	Vakuumlichtgeschwindigkeit	$2,998 \cdot 10^8$	$m/s$
$d_{eff}$	Effektiver nicht-linearer Koeffizient von LBO	$8,31 \cdot 10^{-13}$	$m/V$
$d_n/d_T$	Thermooptischer Koeffizient	-	$1/K$
$f'_{LBO}$	Brennweite der thermischen Linse in LBO	-	$m$
$h$	Planck'sches Wirkungsquantum	$6,626 \cdot 10^{-34}$	$Js$
$h_v$	Laterale Verschiebung	-	$m$
$L_c$	Propagationslänge im GWS	-	$1/m$
$l_{eff}$	Effektive Propagationsstrecke im LBO-Kristall	24	$mm$
$l$	Geometrische Länge des LBO-Kristalls	12	$mm$
$M_h^2$	Beugungsmaßzahl in der horizontalen Strahlebene	-	-
$M_v^2$	Beugungsmaßzahl in der vertikalen Strahlebene	-	-
$m$	Beugungsordnung	-	-
$n_1$	Brechungsindex Umgebung	-	-
$n_2$	Brechungsindex des optisches Keils	-	-
$n_{LBO,\omega}$	Brechungsindex von LBO bei $\lambda = 1030 \text{ nm}$	1,606	-
$P_{Out}$	Ausgangsleistung des Lasers	-	$W$
$P_{Pump}$	Pumpleistung	-	$W$
$P_{Wärme}$	Wärmeleistung	-	$W$
$P_\omega$	Leistung der fundamentalen Strahlung	-	$W$
$P_{2\omega}$	Leistung der frequenzverdoppelten Strahlung	-	$W$
$R$	Krümmungsradius	-	$m$
$R_{TE}$	Reflektivität für TE-polarisierte Strahlung	-	-
$R_{TM}$	Reflektivität für TM-polarisierte Strahlung	-	-
$R_{OC}$	Reflektionsgrad des Auskoppelspiegels	-	-
$T$	Temperatur	-	$^\circ C$
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	-	$^\circ C$
$w$	Strahlradius	-	$m$
$w_{LBO}$	Strahlradius im LBO-Kristall	-	$m$

Symbol	Bedeutung	Wert	Einheit
<b>Griechische Buchstaben</b>			
$\alpha_1$	Einfallswinkel	-	$^\circ$
$\alpha_2$	Ausfallswinkel	-	$^\circ$
$\Delta\alpha$	Änderung des Einfallswinkels	-	$^\circ$
$\Delta\Theta_L$	Änderung des Littrow-Winkels	-	$^\circ$
$\Delta\lambda$	Änderung der Wellenlänge	-	<i>m</i>
$\Delta\lambda_{FWHM}$	Spektrale Bandbreite (FWHM)	-	<i>m</i>
$\Delta k$	Phasenfehlanpassung	-	$1/m$
$\Delta\phi$	Änderung des krit. Schnittwinkels (LBO)	-	$^\circ$
$\Delta R$	$ R_{TE} - R_{TM} $	-	-
$\varepsilon_0$	Dielektrizitätskonstante in Vakuum	$8,854 \cdot 10^{-12}$	<i>As/Vm</i>
$\eta_{QD}$	Quantendefekt bzw. Stokes-Wirkungsgrad	-	-
$\eta_{SHG}$	SHG-Konversionseffizienz	-	-
$\theta$	Nicht-kritischer Schnittwinkel (LBO)	-	$^\circ$
$\theta_i$	Einfallswinkel am GWS	-	$^\circ$
$\theta_L$	Littrow-Winkel	-	$^\circ$
$\theta_{L1}$	Littrow-Winkel des ursprünglichen Strahls	-	$^\circ$
$\theta_{L2}$	Littrow-Winkel des verkippten Strahls	-	$^\circ$
$\theta_m$	Beugungswinkel	-	$^\circ$
$\Lambda$	Gitterperiode	-	<i>m</i>
$\lambda$	Wellenlänge	-	<i>m</i>
$\lambda_P$	Pumpwellenlänge	-	<i>m</i>
$\lambda_1$	Laserwellenlänge vor Verkipfung	-	<i>m</i>
$\lambda_2$	Laserwellenlänge nach Verkipfung	-	<i>m</i>
$\lambda_L$	Laserwellenlänge	-	<i>m</i>
$\lambda_P$	Pumpwellenlänge	-	<i>m</i>
$\lambda_{\omega_0}$	Wellenlänge der fundamentalen Strahlung	1030	<i>nm</i>
$\lambda_{2\omega_0}$	Wellenlänge der frequenzverdoppelten Strahlung	515	<i>nm</i>
$\sigma$	Gittertiefe	-	<i>m</i>
$\phi$	Kritischer Schnittwinkel (LBO)	-	$^\circ$

**Abkürzungen**

AFM	Engl.: Atomic Force Microscopy
AR	Engl.: Anti-Reflection
CHF <sub>3</sub>	Trifluormethan
CW	Engl.: Continuous-Wave
DC	Engl.: Duty-Cycle
FS	Engl.: Fused Silica
FWHM	Engl.: Full-Width at Half-Maximum
GIRO	Engl.: Giant-Reflection to Zero-Order
GWS	Gitterwellenleiterspiegel
GWOC	Engl.: Grating-Waveguide Output Coupler
HR	Engl.: High-Reflection
IP	Engl.: Ion-Plating
LBO	Lithiumtriborat (LiB <sub>3</sub> O <sub>5</sub> )
LG <sub>01</sub> <sup>+</sup>	Laguerre-Gauss'sche Ringmode
LM	Engl.: Leaky Mode
LuAG	Lutetium-Aluminium-Granat (Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )
OC	Engl.: Output Coupler
PV	Engl.: Peak-to-Valley
REM	Raster Elektronen Mikroskopie
RCWA	Engl.: Rigorous Coupled-Wave Analysis
RD	Engl.: Resonant Diffraction
SBIL	Engl.: Scanning-Beam Interference Lithography
SHG	Engl.: Second-Harmonic Generation
SiO <sub>2</sub>	Siliziumdioxid
SPP	Strahl-Parameter-Produkt
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Tantalpentoxid
TE	Transversal elektrisch
TEM	Transversale elektromagnetische Mode
TEM <sub>00</sub>	Transversale Grundmode
TFP	Engl.: Thin-Film Polarizer
TM	Transversal magnetisch
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )
Yb	Ytterbium

# Kurzfassung

Die gezielte Änderung, Anpassung oder Beeinflussung der Eigenschaften eines Laserstrahls, die sogenannte *Strahlformung*, steht kontinuierlich im Fokus von Forschung und Entwicklung. Dabei werden mithilfe von optischen Komponenten die Eigenschaften eines Laserstrahls, sei es die spektrale Zusammensetzung oder die Polarisationsverteilung, gezielt verändert, angepasst und stabilisiert. Um die Verluste durch den Strahlformungsprozess gering zu halten, kann die Manipulation der Eigenschaften des Laserstrahls durch geeignete hochleistungsfähige und verlustarme Komponenten bereits bei seiner Entstehung innerhalb des Laserresonators vorgenommen werden. Gängige Komponenten, welche zur Stabilisierung und Beeinflussung der spektralen Zusammensetzung und der Polarisation des erzeugten Laserstrahls in den Resonator eingebracht werden können, leiden jedoch oftmals an niedrigen Zerstörschwellen oder unwirtschaftlicher Komplexität und führen im Laserbetrieb zu hohen optischen Verlusten sowie störenden thermo-optischen Effekten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der Untersuchung alternativer hochleistungstauglicher Komponenten zur resonatorinternen Strahlformung. Diesbezüglich wird das Konzept der *Gitterwellenleiterspiegel* (GWS) vorgestellt. Diese Komponenten bestehen aus einer Kombination aus Gitterstruktur und dielektrischem Schichtstapel und nutzen den Kopplungsmechanismus eines einfallenden elektromagnetischen Feldes an Moden in den durch den Schichtstapel gebildeten Wellenleiter. Dabei ist der Kopplungseffekt, je nach Auslegungsform der Gitterwellenleiterstruktur, abhängig von der Wellenlänge und der Polarisationsrichtung des einfallenden Feldes. Über die Kopplung an die Wellenleitermoden können gezielt Eigenschaften des oszillierenden Laserstrahls manipuliert und folglich resonatorintern Strahlformung betrieben werden. Ziel dieser Arbeit war es anhand unterschiedlicher Experimente die Hochleistungstauglichkeit bestehender und neuer GWS-Ansätze im Scheibenlaser zu untersuchen.

So wurde im ersten Experiment ein GWS in Littrow-Konfiguration zur Stabilisierung der Phasenanpassungsbedingung eines frequenzverdoppelnden Scheibenlasers eingesetzt. Im Multimode-Betrieb ( $M^2 \approx 20$ , SPP = 3,4 mm · mrad) konnte eine

Ausgangsleistung von mehr als 1 kW bei einer Wellenlänge von 515 nm und einer optischen Effizienz von 51,6% (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 969 nm) sowie 46,0% (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 940 nm) demonstriert werden. Die maximale Leistungsdichte des oszillierenden Laserstrahls auf der Oberfläche des GWS betrug ca.  $40 \text{ kW/cm}^2$ . Die Hochleistungstauglichkeit des GWS wurde zusätzlich anhand eines im Grundmode betriebenen resonatorinternen frequenzverdoppelnden Scheibenlasers bestätigt. Hierbei wurde eine maximale Ausgangsleistung von 419 W bei einer Wellenlänge von 515 nm und einer optischen Effizienz von 45,4% (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 969 nm) erreicht. Die gemessene Beugungsmaßzahl des erzeugten Laserstrahls betrug bei maximaler Ausgangsleistung  $M^2 < 1,36$ . Der eingesetzte GWS blieb trotz einer Leistungsdichte von bis zu  $60 \text{ kW/cm}^2$  unbeschädigt.

In einem weiteren Experiment konnte die Erzeugung radial polarisierter Laserstrahlung mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich anhand eines in den Resonator integrierten GWS demonstriert werden. Dazu wurde eine neue Generation von GWS auf Basis der Kopplung eines einfallenden Strahls an verlustbehaftete Wellenleitermoden entwickelt, welche sich durch eine hohe spektrale Bandbreite der Separation der Reflektivität für TE- und TM-polarisierte Strahlung ( $\geq 20\%$ ) von über 70 nm auszeichnet. Bei einer Wellenlänge von 1030 nm betrug der Unterschied der Reflektivität des GWS für einen TM- und TE-polarisierten Strahl ca. 45%, wobei eine Reflektivität für TM-polarisierte Strahlung von  $(99,8 \pm 0,2)\%$  gemessen wurde. Der Durchmesser der Gitterstruktur betrug 16 mm. Integriert in einen cw-betriebenen Scheibenlaserresonator wurde ein radial polarisierter Laserstrahl mit einer maximalen Ausgangsleistung von 980 W erzeugt. Der optische Wirkungsgrad des Lasers betrug bei maximaler Ausgangsleistung 50,5%. Für den demonstrierten Leistungsbereich betrug der Polarisationsgrad des erzeugten radial polarisierten Laserstrahls durchgehend  $> 95\%$ . In Bezug auf den Stand der Technik zum Zeitpunkt dieser Arbeit konnte die demonstrierbare Ausgangsleistung um einen Faktor von ca. 3,5 gesteigert werden.

Im dritten Experiment wurde ein GWS zur resonatorinternen Strahlgestabilisierung im Scheibenlaser eingesetzt. Dabei konnten die optischen Auswirkungen von Wellenfrontstörungen, welche aufgrund thermisch induzierter Konvektion an der ungekühlten Frontseite des Laserkristalls auftreten und die maximal erreichbare Ausgangsleistung eines im Grundmode betriebenen Scheibenlasers üblicherweise limitieren, effizient kompensiert werden. Die passive Strahlgestabilisierung wird in Littrow-Konfiguration erreicht, sofern die Gitterlinien senkrecht zur Richtung

der auftretenden Konvektion orientiert werden. In dieser Orientierung bewirkt eine Verkippung des oszillierenden Strahls durch die auftretende Konvektion an der Laserscheibe, dass sich der Einfallswinkel auf dem GWS ändert. Dies hat zur Folge, dass der Laser spektral auf die Wellenlänge ausweicht, welche durch die Littrow-Bedingung bei geändertem Einfallswinkel vorgegeben wird und gleichzeitig die größte Verstärkung erfährt. Dieser passive Effekt bewirkt, dass die geometrische Lage des oszillierenden Laserstrahls auf dem optisch angeregten Bereich des Laserkristalls stabilisiert wird. Verglichen mit einem Referenzexperiment ohne passive Strahl-lagestabilisierung konnte in den durchgeführten Experimenten durch Integration des GWS in den Resonator die Ausgangsleistung eines im Grundmode betriebenen Scheibenlasers mehr als verdreifacht (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 969 nm), bzw. mehr als verdoppelt (optische Anregung der Laserscheibe bei einer Pumpwellenlänge von 940 nm) werden. Sowohl die Strahl-lagestabilität als auch die Langzeitstabilität der Ausgangsleistung des Lasers ließen sich durch den resonatorinternen Einsatz des GWS verbessern.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass durch Integration von Gitterwellenleiterspiegeln in Scheibenlaserresonatoren effizient Strahlformung betrieben werden kann. Da trotz resonatorinterner Leistungen im mehrstelligen kW-Bereich die Zerstörschwelle der Komponenten nicht erreicht wurde und keine störende thermo-optische Effekte auftraten, konnte die Hochleistungstauglichkeit dieser Elemente erfolgreich bestätigt werden.