

# **Periodenchirp optischer Gitter**

von Dr.-Ing. Florian Bienert  
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: Prof. Dr.-Ing. Stephan Reichelt

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., 2024

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2023

Print ISBN 978-3-8316-5061-3  
Ebook ISBN 978-3-8316-7799-3

Printed in Germany

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Liste der verwendeten Symbole</b> .....	<b>5</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>7</b>
<b>Kurzfassung der Arbeit</b> .....	<b>9</b>
<b>Extended Abstract</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>17</b>
1.1 Motivation .....	17
1.2 Stand der Technik – Optische Gitter .....	20
1.2.1 Grundlagen.....	20
1.2.2 Gitterarten und Anwendungen.....	21
1.2.3 Gitterherstellung .....	23
1.3 Stand der Technik – Periodenchirp .....	28
1.3.1 Theorie und Modellierung des Periodenchirps.....	28
1.3.1.1 Grundlagen des Chirps.....	28
1.3.1.2 Entwicklungsstand .....	30
1.3.1.3 Fazit und Zielsetzung .....	40
1.3.2 Messung des Periodenchirps.....	41
1.3.2.1 Indirekte Verfahren .....	41
1.3.2.2 Direkte Verfahren.....	46
1.3.2.3 Fazit und Zielsetzung .....	48
1.3.3 Effekte des Periodenchirps in der Applikation .....	48
1.3.3.1 Entwicklungsstand .....	48
1.3.3.2 Fazit und Zielsetzung .....	52
1.3.4 Vermeidung des Periodenchirps .....	52
1.3.4.1 Grundlagen der Reduzierung des Chirps .....	52
1.3.4.2 Entwicklungsstand .....	54
1.3.4.3 Fazit und Zielsetzung .....	57

---

<b>2 Theoretische Untersuchung des Periodenchirps</b> .....	<b>58</b>
2.1 Comprehensive theoretical analysis of the period chirp in laser interference lithography.....	58
2.2 General mathematical model for the period chirp in laser interference lithography.....	91
<b>3 Simple spatially resolved period measurement of chirped pulse compression gratings</b> .....	<b>110</b>
<b>4 Detrimental effects of period-chirped gratings in pulse compressors</b> .....	<b>130</b>
<b>5 Theoretical investigation on the elimination of the period chirp by deliberate substrate deformations</b> .....	<b>159</b>
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>178</b>
6.1 Theorie und Modellierung des Periodenchirps.....	178
6.1.1 Zusammenfassung .....	178
6.1.2 Ausblick .....	179
6.2 Messung des Periodenchirps .....	180
6.2.1 Zusammenfassung .....	180
6.2.2 Ausblick .....	181
6.3 Effekte des Periodenchirps in der Applikation.....	181
6.3.1 Zusammenfassung .....	181
6.3.2 Ausblick .....	182
6.4 Vermeidung des Periodenchirps.....	183
6.4.1 Zusammenfassung .....	183
6.4.2 Ausblick .....	184
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>186</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>209</b>

# Kurzfassung der Arbeit

Optische Gitter sind in der Photonik sowie in der heutigen Laserentwicklung essenzielle Komponenten und erlangen zunehmend an Bedeutung [1–3]. Neben den verschiedenen Einsatzgebieten in Laseroszillatoren und Messsystemen finden sie vor allem in Pulscompressoren und Pulsstreckern Anwendung. Damit bilden sie die Basis für die „Chirped Pulse Amplification“ (CPA), deren Erfindung 2018 mit dem Nobelpreis in Physik geehrt wurde. Optische Gitter sind somit die unmittelbaren Enabler der Pulsspitzenleistungsskalierung heutiger Lasersysteme, welche wiederum wichtige Werkzeuge in der Forschung, Medizin und Industrie darstellen. Die Herstellung solcher Gitter erfolgt durch Prozesse der Mikro- und Nanoindustrie, bei welchen der lithografische Prozess der entscheidende ist. Die Lithografie definiert die Gitterstege und deren Gitterperiode, welche der wichtigste der verschiedenen Gitterparameter ist. Eine gängige lithografische Methode, welche auf den ersten Blick ideal für die Erzeugung homogener und äquidistanter Gitterstege erscheint, ist die Laser-Interferenzlithografie (LIL). In der Praxis wird diese jedoch von einem nachteiligen Effekt, dem sogenannten Periodenchirp, begleitet. Der Periodenchirp ist eine Konsequenz dessen, dass über eine gewisse Propagationsstrecke hinweg keine planen Wellenfronten existieren können. Statt parallelen Gitterstegen mit konstanter Gitterperiode erzeugt das entstehende Interferenzmuster gekrümmte Gitterstege und eine örtliche Abhängigkeit der Gitterperiode.

Dieser Effekt, der Periodenchirp bei der LIL, ist Hauptgegenstand der vorliegenden Arbeit und war zu deren Beginn vergleichsweise unbekannt und nicht vollständig verstanden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher eine ganzheitliche Untersuchung des Periodenchirps angestrebt, welche schließlich in vier Schritten erfolgte. Diese vier Schritte finden sich in den Kapiteln 2 bis 5 wieder. Der erste Schritt umfasst die theoretische Untersuchung und die Modellierung der Entstehung des Periodenchirps. Im zweiten Schritt wurde ein Aufbau entwickelt, um die örtliche Abhängigkeit der Periode gechirpter Gitter zu messen und zu quantifizieren. Auf Basis dieses Aufbaus erfolgte im dritten Schritt eine numerische und experimentelle Untersuchung der Auswirkungen des Periodenchirps, wenn gechirpte Gitter in Pulscompressoren verwendet werden. Im vierten Schritt wurde schließlich ein Konzept erarbeitet, um den Periodenchirp direkt bei der Herstellung zu vermeiden.

Die im ersten Schritt (Kapitel 2) erfolgte theoretische Untersuchung des Periodenchirps basierte wie die Publikationen anderer Gruppen zunächst auf dem Punktquellenmodell. Es wurde gezeigt, dass innerhalb des Punktquellenmodells drei verschiedene Belichtungsfälle existieren können: Die Belichtung mit divergierenden Kugelwellen, die Belichtung mit konvergierenden Kugelwellen und die gemischte Belichtung mit einer divergierenden Kugelwelle und einer konvergierenden Kugelwelle. Erstmals wurden für alle dieser drei Belichtungsfälle Gleichungen zur Bestimmung der Gitterperiode und der Krümmung der Gitterstege hergeleitet. Dies erfolgte jeweils für einen symmetrischen Belichtungs Aufbau (Anordnung bei der beide Punktquellen den jeweils gleichen Abstand von der Substratmitte sowie einen jeweils gleichen Abstand von der Substratoberfläche haben) und für einen allgemeinen Aufbau, bei welchem die Belichtung eines beliebig geformten und beliebig orientierten Substrats durch beliebig angeordnete Punktquellen erfolgt. Dieses in dieser Arbeit entwickelte umfassende Modell schaffte erstmals eine konsistente Basis für die Beschreibung aller Fälle, welche im Rahmen des Punktquellenmodells möglich sind. Zudem wurden für alle Fälle Gleichungen zur Beschreibung der Flächen konstruktiver Interferenz hergeleitet. In einer zweiten Arbeit wurde ein erweitertes Modell erarbeitet, welches auf der Verwendung von Gauß-Strahlen statt Punktquellen fußt. Dieses erweiterte Modell ist somit nicht nur für die Beschreibung der Fernfeldinterferenz anwendbar, sondern gilt auch für die der Nahfeldinterferenz. Das erlaubte erstmals die Beschreibung einer weiteren lithografischen Technik, der sogenannten „Scanning Beam Interference Lithography“ (SBIL). Darüber hinaus bildet das Modell einen einheitlichen mathematischen Formalismus bei dem die diversen Fallunterscheidungen, wie sie für das Punktquellenmodell benötigt werden, entfallen.

Die Entwicklung eines Aufbaus zur Messung des Periodenchirps, welche im zweiten Schritt (Kapitel 3) durchgeführt wurde, basierte auf der Technologie eines „Long Trace Profilers“ (LTP). Der Aufbau wurde dahingehend entwickelt, mit geringem Aufwand und hoher Geschwindigkeit kleinste Änderungen der Gitterperiode aus den Änderungen des Beugungswinkels eines Laserstrahls zu ermitteln. Die Fähigkeit, kleinste Änderungen des Beugungswinkels zu messen, wurde unter anderem dadurch erreicht, dass erstmals die Sensitivität des Beugungswinkels gegenüber Periodenänderungen berücksichtigt wurde. Die erforderliche Stabilität der Messung und die gezielte Verringerung der Messunsicherheit wurde durch eine zusätzliche Überwachung der 0ten Beugungsordnung (BO) erreicht. Schlussendlich erlaubte der in dieser Arbeit entwickelte Aufbau ein Scannen der Gitteroberfläche mit einer Genauigkeit in der Bestimmung der Änderung der Gitterperiode von 15 pm und einer Messdauer von ca. 2 s pro Messpunkt. Damit lag die Messunsicherheit im Bereich derselben

Größenordnung wie die Messunsicherheit der besten Aufbauten verschiedener nationaler Messanstalten. Gleichzeitig übertraf die präsentierte Messgeschwindigkeit jene dieser Aufbauten um drei Größenordnungen. Die Funktionalität des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Messaufbaus wurde anhand der Charakterisierung zweier Pulskompressionsgitter demonstriert, bei welchen eines eine gechirpte und das andere eine ungechirpte Gitterperiode aufwies.

Im dritten Schritt (Kapitel 4) wurden die Auswirkungen des Periodenchirps auf die Leistungsfähigkeit von optischen Pulscompressoren untersucht. Der Fokus lag dabei auf dem Einfluss des Chirps auf die Strahlqualität des komprimierten Strahls und der Dauer der komprimierten Pulse. Die Untersuchungen erfolgten experimentell, numerisch und theoretisch. Für die Experimente wurde ein Pulscompressor mit gechirpten Gittern verwendet, welche mittels des zuvor beschriebenen Messaufbaus charakterisiert wurden. In einem ersten Experiment wurde ein schmalbandiger, aber spektral durchstimmbarer Dauerstrich-Laser mit einer Leistung von 200 mW verwendet. Mit diesem wurde die Propagation von Strahlen verschiedener Wellenlängen durch den Kompressor untersucht. In einem zweiten Experiment wurden die gestreckten Pulse eines Ultrakurzpulslasers mit 1 kW mittlerer Leistung komprimiert. Die Analyse der beiden Experimente wurde parallel durch eine umfangreiche – und eigens hierfür entwickelte – Raytracing-Simulation unterstützt. Es konnte erstmals nachgewiesen werden, dass der Periodenchirp kritische Auswirkungen auf die Strahlqualität des Ausgangsstrahls des Kompressors und auf die Komprimierbarkeit der Laserpulse hat. Diese beiden nachteiligen Effekte werden dadurch hervorgerufen, dass die verschiedenen Spektralkomponenten der Pulse (bzw. des Strahls) nach der Propagation durch den Kompressor räumlich und zeitlich nicht mehr korrekt überlagert sind. Sowohl die Experimente als auch die Simulation zeigten, dass besonders die fehlerhafte räumliche Überlagerung der verschiedenen Spektralkomponenten (engl.: Spatial Chirp) ein charakteristisches Muster aufweist, welches den Chirp eindeutig als Ursache identifizierbar macht. Somit lassen sich die Effekte des Chirps klar von den Effekten anderer Fehler, wie beispielsweise Dejustage, unterscheiden.

Im vierten und letzten Schritt (Kapitel 5) wurde die Vermeidung des Periodenchirps direkt bei der Herstellung der Gitter angestrebt. Bei den klassischerweise verwendeten LIL-Aufbauten wird ein planes Substrat mittels zweier symmetrisch einfallender und interferierender Strahlen belichtet. Dieser Aufbau erlaubt jedoch keine Eliminierung des Periodenchirps, sondern lediglich dessen Verringerung. Diese Verringerung skaliert wiederum quadratisch mit dem Abstand der Punktquellen vom Substrat und macht somit die Verwendung großer Distanzen oder großer Kollimationsoptiken notwendig. Um dies

zu vermeiden, wurde in der vorliegenden Arbeit eine andere von Michael E. Walsh und Henry I. Smith [4] vorgeschlagene Technik übernommen. Bei dieser Technik wird das Substrat während der Belichtung so verformt, dass nach der Belichtung, wenn das Substrat wieder flach ist, der Periodenchirp eliminiert ist. Die Herausforderung dabei ist, die Verformung zu finden, welche diese Kompensation bewirkt. Die Bestimmung dieser sogenannten „Zero-Chirp-Geometrie“ gelang bis dato jedoch weder Walsh und Smith [4] noch einer anderen Forschungsgruppe und war daher das Ziel der eigenen Untersuchungen. Mittels eines eigens entwickelten mathematischen Modells konnte gezeigt werden, dass sich die erforderliche Geometrie des durchgebogenen Substrates durch die Rotation einer Kurve ergibt, welche wiederum durch eine Differentialgleichung (DGL) erster Ordnung bestimmt wird. Um die DGL zu lösen, wurde ein geeignetes Optimierungsverfahren entwickelt. Bei diesem werden die Koeffizienten verschiedener vordefinierter Funktionen (bspw. Polynome, Sphären, Ellipsoide oder Hyperbeln) variiert, um die Lösung der DGL anzunähern. Für einen beispielhaft untersuchten (simulativen) Belichtungsaufbau erbrachte die durch ein Polynom 4ter Ordnung genäherte Lösung der DGL sehr gute Ergebnisse. Die simulierte Periode des im durchgebogenen Zustand belichteten Gitters variierte lediglich um 2,7 pm (Unterschied zwischen Maximal- und Minimalwert der Periode (engl.: Peak-to-Valley, PV) über die gesamte Oberfläche des Gitters). Bei der simulierten Belichtung eines flachen Substrates dagegen betrug diese Variation 2 nm. Dies entspricht einer Verbesserung der Variation der Gitterperiode um fast drei Größenordnungen, wenn das Gitter im durchgebogenen statt im gängigerweise flachen Zustand belichtet wird. Mit der erstmaligen Entwicklung der mathematischen Grundlagen zur Bestimmung der „Zero-Chirp“-Geometrie konnte damit auch erstmals die Berechnung einer Substratgeometrie demonstriert werden, bei welcher der Chirp nahezu vollständig eliminiert wird.

# 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**

Zerstörungsschwellen 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 Entladungsstrecken 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 3-8316-0460-8

# 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 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 Nahteigenschaft bei Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

### Mikhail Larionov

Kontakterung 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 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 Getriebebau – 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

**Tilman Froschmeier-Hanss**

Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsangepasster Stahlwerkstoffverbindungen  
2014, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-4347-9

**Moritz Vogel**

Specialty 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 Heißrissen 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 978-3-8316-4643-2

**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 Schmelzfluss 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

**Christian Hagenlocher**

Die Kornstruktur und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen  
2020, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4864-1

**Florian Fetzer**

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen mittels reduzierter Modelle.  
2020, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-4874-0

**Michael Jarwitz**

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften.  
2020, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4882-5

**Christian Röhler**

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern  
2020, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4888-7

**Martin Sommer**

Laserstrahlschweißen der Aluminiumlegierung AlMgSi mittels Strahloszillation  
2021, 110 Seiten, ISBN 978-3-8316-4898-6

**Birgit Weichelt**

Experimental Investigations on Power Scaling of High-Brightness cw Ytterbium-Doped Thin-Disk Lasers.  
2021, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4914-3

**Sebastian Faas**

Oberflächenfunktionalisierung von Stahl mit UKP-Lasern mit mehreren Hundert Watt mittlerer Laserleistung.  
2021, 95 Seiten, ISBN 978-3-8316-4935-8

**Daniel Weller**

Erhöhung der Prozesssicherheit beim Remote-Laserstrahlfügen von Aluminiumwerkstoffen.  
2021, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4940-2

**Sebastian Hecker**

Verfahren zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern  
2022, 132 Seiten, ISBN 978-3-8316-4955-6

**Frieder Beirow**

Leistungsskalierung ultrakurz gepulster radial polarisierter Laserstrahlung.  
2022, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4970-9

**Meiko Boley**

Bestimmung und Regelung der Kapillar- und Nahttiefe beim Laserstrahlschweißen.  
2022, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4986-0

**Christoph Röcker**

Flexible Verstärkung und Frequenzkonversion ultrakurzer Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich  
2022, 182 Seiten, ISBN 978-3-8316-4987-7

**Oliver Bocksrocker**

Mechanismen der Entstehung von Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1  $\mu\text{m}$  Wellenlänge  
2023, 128 Seiten, ISBN 978-3-8316-4999-0

**Daniel Förster**

Energieeinkopplung und Energieumwandlungsprozesse bei der Bearbeitung von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen  
2023, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-5009-5

**Daniel Holder**

Laser micromachining with target depth  
2023, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-5010-1

**Florian Bienert**

Periodenchirp optischer Gitter  
2024, 222 Seiten, ISBN 978-3-8316-5061-3