



**Laserinstitut**  
Hochschule Mittweida



**HOCHSCHULE  
MITTWEIDA**  
University of Applied Sciences

Tagungsunterlagen

# 12. Mittweidaer Lasertagung

10./11. November 2021 an der Hochschule Mittweida



# INHALTSVERZEICHNIS

## Keynote-Vortrag

### **Pulverbasiertes Laserauftragsschweißen in der Entwicklung neuer Legierungen** .....007

Andreas Ostendorf

Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

## Session 1: Additive Fertigung

### **Laseradditive Fertigung mit grüner Wellenlänge** .....008

Sabrina Vogt<sup>1</sup>, Marco Göbel<sup>1</sup>, Florian Hermann<sup>1,2</sup>, Michael Thielmann<sup>1</sup>

1: TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH; 2: Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering, University of Stuttgart

### **Funktionales Laserfinishing additiv gefertigter PA12-Bauteile** .....009

Lukas Eckhardt<sup>1</sup>, Michel Layher<sup>1</sup>, Andreas Hopf<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Markus May<sup>2</sup>, Steven Lachmund<sup>2</sup>, Benjamin Buttler<sup>3</sup>

1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena; 2: 3Faktur GmbH; 3: GOT Gesellschaft für Oberflächentechnik mbH

### **Laser- und Elektronenstrahlschweißen an konventionell und additiv hergestelltem AlSi10Mg Material** .....010

Jan Drechsel<sup>1</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>, Paul Hollmann<sup>2</sup>, Horst Biermann<sup>2</sup>, Rolf Zenker<sup>3</sup>

1: Laserinstitut Hochschule Mittweida; 2: TU Bergakademie Freiberg 3: Zenker Consult

### **Herstellung hybrider Komponenten mittels Laserstrahlschweißen** .....011

Stefan Ulrich, Mathias Rosenblatt, Matthias Pieper

Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH

## Session 2: Lasermikrobearbeitung

### **Influence of the initial surface roughness on the ablation efficiency of metals** .....012

Simon Ruck<sup>1,2</sup>, David K. Harrison<sup>2</sup>, Anjali DeSilva<sup>2</sup>, Simon Dikel<sup>1</sup>, Max-Jonathan Kleefoot<sup>1</sup>, Harald Riegel<sup>1</sup>

1: Hochschule Aalen; 2: Glasgow Caledonian University

### **Direkte, laserbasierte Herstellung von Mikrolinsenarrays aus Glas** .....013

Martin Kahle, Daniel Conrad, Stefan Fricke

ifw Jena - Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH

### **Herstellung von Mikrostrukturen zur Beeinflussung des Bahndrehimpulses elektromagnetischer Strahlung** .....014

Sebastian Büttner, Michael Pfeifer, Steffen Weißmantel

Laserinstitut Hochschule Mittweida

### **Optimized Laser Cutting Processes and System Solutions for Separation of Ultra-Thin Glass for OLED Lighting and Display Applications** .....015

Rene Liebers

3D-Micromac AG

## **Session 3: Lasertechnik und Sonderverfahren**

### **Long-term-stable 120-W, 220- $\mu$ J, 120-fs Thulium-based fiber-CPA .....016 for materials processing**

Christian Gaida<sup>1</sup>, Fabian Stutzki<sup>1</sup>, Martin Gebhardt<sup>2,3</sup>, Tobias Heuermann<sup>2,3</sup>, Sven Breitkopf<sup>1</sup>,  
Tino Eidam<sup>1</sup>, Jan Rothhardt<sup>2,3,4</sup>, Jens Limpert<sup>1,2,3,4</sup>

1: Active Fiber Systems GmbH; 2: Institute of Applied Physics, Friedrich-Schiller-Universität Jena;  
3: Helmholtz-Institute Jena; 4: Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering

### **Effiziente Impulskompression im industriellen Kontext mittels Multipasszellen .....017**

Kilian Fritsch, Christian Franke, Oleg Pronin

Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg

### **Erzeugen von leitfähigen Strukturen auf Kunststoffoberflächen durch .....018 Laserstrahlaktivierung**

Michael Seiler<sup>1</sup>, Andreas Knauft<sup>1</sup>, Andrea Barz<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Andrés Fabián Lasagni<sup>2,3</sup>

1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena; 2: Technische Universität Dresden; 3: Fraunhofer-Institut für  
Werkstoff- und Strahltechnik IWS

### **Surface Quality of Laser Rod End melted Shape-Memory Nitinol Preforms .....019**

Yang Lu, Tim Radel

Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH

## **Keynote-Vortrag**

### **High-power fiber lasers: challenges and perspectives in power scaling .....020**

Andreas Tünnermann

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik, Deutschland

## **Session 4: High Speed Laserbearbeitung**

### **Multi beam micro processing with high power ultrashort pulsed laser for printing .....021 and embossing tools**

Stephan Bruening<sup>1</sup>, Du Keming<sup>2</sup>, Arnold Gillner<sup>3</sup>

1: Schepers GmbH & Co. KG; 2: EdgeWave GmbH; 3: Fraunhofer ILT

### **Beam shaping and splitting with diffractive optics for high performance laser .....022 scanning systems**

Thomas Mann<sup>1</sup>, Holger Schlüter<sup>1</sup>, Florian Merkt<sup>1</sup>, Felix Lange<sup>1</sup>, Alex Skliar<sup>2</sup>, Natan Kaplan<sup>2</sup>,

Stephan Eifel<sup>3</sup>, Olga Chemerenko<sup>3</sup>, Patrick Gretzki<sup>3</sup>

1: SCANLAB GmbH; 2: Holo/Or Ltd.; 3: Pulsar Photonics GmbH

### **Qualitätsoptimierter Hochrateabtrag von Werkzeugstahl und Hartmetall .....023 mittels ultrakurzer Laserpulse im Burstbetrieb**

Christian Kreisel<sup>1</sup>, Tommy Knebel<sup>1</sup>, Ronny Menzel<sup>1</sup>, Daniel Metzner<sup>2</sup>, Peter Lickschat<sup>2</sup>, Steffen Weißmante<sup>2</sup>

1: ACSYS Lasertechnik GmbH; 2: Laserinstitut Hochschule Mittweida

### **High-power nanosecond pulsed laser engraving with an ultra-high speed .....024 polygon mirror scanner**

Florian Rößler<sup>1</sup>, Mathias Müller<sup>2</sup>, Robby Ebert<sup>1,2</sup>, André Streek<sup>1,2</sup>

1: MOEWE Optical Solutions GmbH; 2: Laserinstitut Hochschule Mittweida

### **Laserstrahlglätten von Edelstahl mittels 10 kW Monomode Laser .....025**

Linda Pabst, Robby Ebert, André Streek

Laserinstitut Hochschule Mittweida

**Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen – Neue Perspektiven für das Beschichten** .....026  
Sabrina Vogt<sup>1</sup>, Marco Göbel<sup>1</sup>, Florian Hermann<sup>1,2</sup>  
1: TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH; 2: Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering, University of Stuttgart

## **Session 5: Ultrakurzpuls laserbearbeitung**

**Laser-induced Surface Structuring for Electron Cloud Mitigation in Particle Accelerators** .....027  
Elena Bez<sup>1</sup>, Marcel Himmerlich<sup>1</sup>, Ana Karen Reascos Portilla<sup>1</sup>, Lucie Baudin<sup>1</sup>, Pierre Lorenz<sup>2</sup>, Klaus Zimmer<sup>2</sup>, Mauro Taborelli<sup>1</sup>, Andre Anders<sup>2</sup>  
1: European Organization of Nuclear Research (CERN); 2: Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V.

**Smarte Ultrakurzpuls laserbearbeitung mit rotierendem Strahl - Lasebohren, -schneiden und -drehen** .....028  
Florian Lendner  
GFH GmbH

**Optimierung der Bearbeitungsstrategie für scannerbasierte Materialbearbeitungsprozesse mit Ultrakurzpuls lasern** .....029  
Axel Fehrenbacher<sup>1</sup>, Marc Sailer<sup>1</sup>, Christian Eberhardt<sup>1</sup>, Steffen Rübling<sup>2</sup>, Aleksander Budnicki<sup>1</sup>, Dirk Sutter<sup>1</sup>  
1: TRUMPF Laser GmbH; 2: TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH

**Entstehung unerwünschter Röntgenstrahlung bei der Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung** .....030  
Jörg Schille<sup>1</sup>, Dany Kattan<sup>2</sup>, Sebastian Kraft<sup>1</sup>, Theo Pflug<sup>1</sup>, Alexander Horn<sup>1</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>  
1: Laserinstitut Hochschule Mittweida; 2: Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

## **Session 6: Lasermesstechnik**

**Hochkontrast-Ultrakurzpulsmessungen für fortgeschrittene Industrieanwendungen und Laserentwicklung** .....031  
Matthias Baudisch, Mateusz Ibek, Edlef Büttner, Peter Staudt  
APE Angewandte Physik & Elektronik GmbH

**Untersuchungen zur fluenzabhängigen transienten Reflektivität von Edelstahl nach Anregung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung** .....032  
Theo Pflug<sup>1</sup>, Markus Olbrich<sup>1</sup>, Jan Winter<sup>2</sup>, Jörg Schille<sup>1</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>, Heinz Huber<sup>2</sup>, Alexander Horn<sup>1</sup>  
1: Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland; 2: University of Applied Sciences Munich

**Erzeugung von laserinduzierte Schockwellensignalen für die Vermessung von Asphaltkörpern** .....033  
Manuel Pfeiffer, Jörn Hübelt, Steffen Weißmantel  
Hochschule Mittweida

**Relevanz des Fokusshift für die Produktion** .....034  
Stephan Holesch  
Primes GmbH

## **Abschlussvortrag**

**3D-Druck in Metall am Laserinstitut Hochschule Mittweida – Von Mikro bis Großformat** .....035  
André Streek  
Laserinstitut Hochschule Mittweida

## Posterbeiträge

- Mantelmode-Superkontinuumserzeugung** .....036  
Tobias Baselt, Christopher Taudt, Peter Hartmann  
Fraunhofer IWS, Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik,  
Westfälische Hochschule Zwickau, Fakultät Physikalische Technik/Informatik
- Laserinduzierte Kristallisation dünner Co-Fe-B-Schichten** .....037  
Sandra Busse<sup>1</sup>, Apoorva Sharma<sup>2</sup>, Maria Almeida-Hoffmann<sup>3</sup>, Patrick Matthes<sup>4</sup>, Nicole Köhler<sup>3</sup>,  
Mathias Müller<sup>1</sup>, Stefan Schulz<sup>3,4</sup>, Dietrich Zahn<sup>2</sup>, Georgeta Salvan<sup>2</sup>, Alexander Horn<sup>1</sup>  
1: Laserinstitut Hochschule Mittweida; 2: Physikinstitut, TU Chemnitz; 3: Zentrum für  
Mikrotechnologie (ZfM), TU Chemnitz; 4: Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS)
- Anwendung des metallischen Mikro-3D-Druckes für die Demonstratorherstellung** .....038  
Julian Drechsel, Martin Erler, Robby Ebert, Horst Exner  
Laserinstitut Hochschule Mittweida
- FRET-assisted structural model of a ribosomal tertiary contact**.....039  
Felix Erichson<sup>1</sup>, Fabio D. Steffen<sup>2</sup>, Richard Börner<sup>1</sup>  
1: Laserinstitut Hochschule Mittweida, 2: Department of Chemistry, University of Zurich
- Prozesscharakterisierung des Laserstrahlaufragschweißens an Al-Si-Legierungen** .....040  
**zum Zweck der Instandsetzung von Gussteilen**  
Michael Güpner<sup>1</sup>, Tristan Drawert<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Heiko Lange<sup>2</sup>  
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena; 2: ICS Industrieleistungen GmbH
- Virtuelle Produktoptimierung von Lasermaterialbearbeitungsanlagen** .....041  
Andreas Hopf<sup>1</sup>, Michael Güpner<sup>1</sup>, Christian Rochholz<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Tino Dannenberg<sup>2</sup>, Dominik Kühn<sup>3</sup>  
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena; 2: Dynardo GmbH an Ansys Company; 3: LightTrans International UG
- Unerwartete Debrisablagerungen bei der Ultrakurzpuls-Multispot-Bearbeitung** .....042  
Sebastian Kraft<sup>1</sup>, Tong Zhou<sup>2</sup>, Jörg Schille<sup>1</sup>, Walter Perrie<sup>2</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>  
1: Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland;  
2: Laser Group, School of Engineering, University of Liverpool
- Excitation and ablation of P3HT with spectral shaped ultrafast mid-IR laser radiation** .....043  
Philipp Lungwitz, Theo Pflug, Markus Olbrich, Alexander Horn  
Laserinstitut Hochschule Mittweida
- Optimierung eines optischen Aufbaus für die kombinierte TIRF-/ konfokale Mikroskopie** .....044  
Hannes Michaelsen, Richard Börner  
Laserinstitut Hochschule Mittweida
- Bestrahlung einer dicken Goldschicht mit Einzelpulsen von ultrakurz** .....045  
**gepulster Laserstrahlung**  
Markus Olbrich, Theo Pflug, und Alexander Horn  
Laserinstitut Hochschule Mittweida
- Ultraschnelle zeit- und orts aufgelöste Reflektometrie an der Rückseite** .....046  
**von Goldschichten verschiedener Schichtdicke**  
Markus Olbrich, Theo Pflug, Florian Lull und Alexander Horn
- Grundlagen zur laserinduzierte Schockwellenanregung in Asphaltkörpern** .....047  
Manuel Pfeiffer, Jörn Hübel, Steffen Weißmantel  
Hochschule Mittweida

<b>RNA fluorescence labelling strategies for biophotonic assays .....</b>	<b>048</b>
<u>Vanessa Schumann</u> , Richard Börner Laserinstitut Hochschule Mittweida	
<b>Melting point analysis of the metal ion dependent NA tertiary contact formation: a case report .....</b>	<b>049</b>
<u>Philipp Vierig</u> , Richard Börner Laserinstitut Hochschule Mittweida	
<b>FRET studies of fluorescently labelled RNA biomolecules with the help of Fluoroskan Ascent FL .....</b>	<b>050</b>
<u>Anne Katrin Winkler</u> , Richard Börner Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida	
<b>Sponsoring .....</b>	<b>051</b>
<b>Firmenausstellung .....</b>	<b>053</b>

# Pulverbasiertes Laserauftragsschweißen in der Entwicklung neuer Legierungen

Andreas Ostendorf

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Laseranwendungstechnik, 44780 Bochum

Das Laserauftragsschweißen bietet aufgrund seiner Flexibilität in der Materialzufuhr neue Möglichkeiten des In-situ Legierens und damit erstmals auch die Möglichkeit, im Hochdurchsatz eine große Zahl verschiedener Legierungen in Volumenbauteilen zu realisieren und vergleichend zu charakterisieren. Eine in den letzten Jahren zunehmend untersuchte Werkstoffklasse bilden die Hoch-Entropie Legierungen (HEA). In diesem Beitrag wird das Laserauftragsschweißen zur Herstellung von refraktären TiZrNbHfTa HEA beschrieben.

## Motivation

Hoch-Entropie Legierungen (HEA) sind Werkstoffe, die kein zugrundeliegendes Element besitzen, sondern deren Legierungselemente zu gleichen oder relativ ähnlichen Anteilen vorliegen. Dieses Werkstoffdesign eröffnet einen stark ausgedehnten Raum für potentielle, neue Legierungen. Eine effektive Untersuchung dieser neuen Möglichkeiten erfordert jedoch eine schnelle und effiziente Legierungssynthese. Refraktäre HEA wie TiZrNbHfTa (Titan, Zirkonium, Niob, Hafnium, Tantal) wird ein überragendes Eigenschaftsprofil aus Temperaturbeständigkeit und Gewicht zugesprochen. Diese Legierungen bestehen aus Elementen mit hohen Schmelzpunkten und oxidieren bei erhöhten Temperaturen in Umgebungsluft. Daher hat sich in der Legierungssynthese das Vakuum-Lichtbogenschmelz Verfahren etabliert, was jedoch aufwändig ist und lediglich die Herstellung fester Legierungszusammensetzungen ermöglicht.

## Experimente

In dieser Präsentation wird das Laserauftragsschweißen (DED-LB/M) und in-situ Legieren zur flexiblen Herstellung von refraktären TiZrNbHfTa Hoch-Entropie Legierungen gezeigt. Ein neuer DED-LB Aufbau und Syntheseweg wurde konstruiert, mit denen Bauteile schichtweise aus elementaren, refraktären Pulvern realisiert werden können. Die Herausforderungen des in-situ Legierens von stark variierenden Pulvermischungen mit großen Unterschieden im Schmelzpunkt werden beschrieben und eine erfolgreiche Lösungsstrategie mit einem eigens konstruierten Pulverförderer präsentiert. Diese ermöglicht sowohl eine effiziente Synthese von äquiatomaren Legierungen als auch von Variationen und Materialgradienten. Mittels Materialgradienten können sehr elegant Hochdurchsatz-Analysen zahlreicher Zusammensetzungen in einer einzelnen Probe durchgeführt werden. Dieser neue Syntheseweg wurde auch eingesetzt, um die Einflüsse der Elemente und von Stickstoffverunreinigungen auf die Mikrostrukturen und die Festigkeiten genauer zu untersuchen.

## Ergebnisse

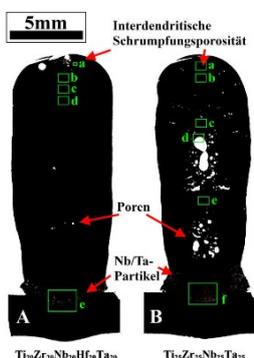


Abb. 1: Lichtmikroskopische Querschnitte variierender refraktärer HEA-Legierungen

Es konnte gezeigt werden, dass DED-LB für die Materialwissenschaft eine Alternative zum Vakuum-Lichtbogenschmelzen ist, die nicht nur gleichwertige Mikrostrukturen, sondern darüber hinaus auch Materialgradienten für Hochdurchsatz-Analysen synthetisieren kann. Dabei kann der Einfluss einzelner Elemente auf die Mikrostruktur und das Erstarrungsverhalten und damit auch auf die Porenbildung (Abb. 1) dokumentiert werden. Ein weiteres Ergebnis ist, dass die Stickstoffverunreinigungen in besonderer Weise die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Darüber hinaus verspricht DED-LB als additives Fertigungsverfahren die zukünftige Herstellung von Bauteilen aus refraktären Legierungen.

## Literatur

- Dobbelstein, Ostendorf et al 2021 Int. J. Extrem. Manuf. 3 015201
- Dobbelstein, Ostendorf et al. 2019, Add. Manuf. 25, 252
- Dobbelstein, Ostendorf, et al. 2018, Add. Manuf. 24, 386

# Laseradditive Fertigung mit grüner Wellenlänge

Sabrina Vogt, Marco Göbel, Florian Hermann, Michael Thielmann  
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen

Durch einen Laser mit einer Wellenlänge von 515 nm, können stark reflektierende Materialien verarbeitet werden. Dieser ermöglicht auch die additive Fertigung von Kupfer und Kupferlegierungen, die mit Infrarotwellenlänge nur schwer zu verarbeiten sind. Mit dem Vortrag stellen wir den Fortschritt bei der Herstellung von Kupfer und Kupferlegierung mit dem grünen Laser, die durch die Erforschung von Prozessparametern erzielt wurden, um speziell auf die einzigartigen Herausforderungen der Laserbearbeitung dieser Klasse von hochreflektierenden, hochleitfähigen Materialien einzugehen. Es wird direkt der Vergleich zur Bearbeitung mit infrarotem Laser vorgenommen. Dabei werden Eigenschaften wie dem Gefüge, Dichte sowie Härte untersucht. Diese Vorstellungen werden für zwei additive Verfahren vorgestellt: pulverbettbasiertes Laserschmelzen und dem Laserauftragschweißen. Zum Schluss wird eine Übersicht dargestellt mit möglichen Applikationen und Anwendungen, die für diese Verfahren geeignet sind.

## Grüne Wellenlänge für die laseradditive Fertigung

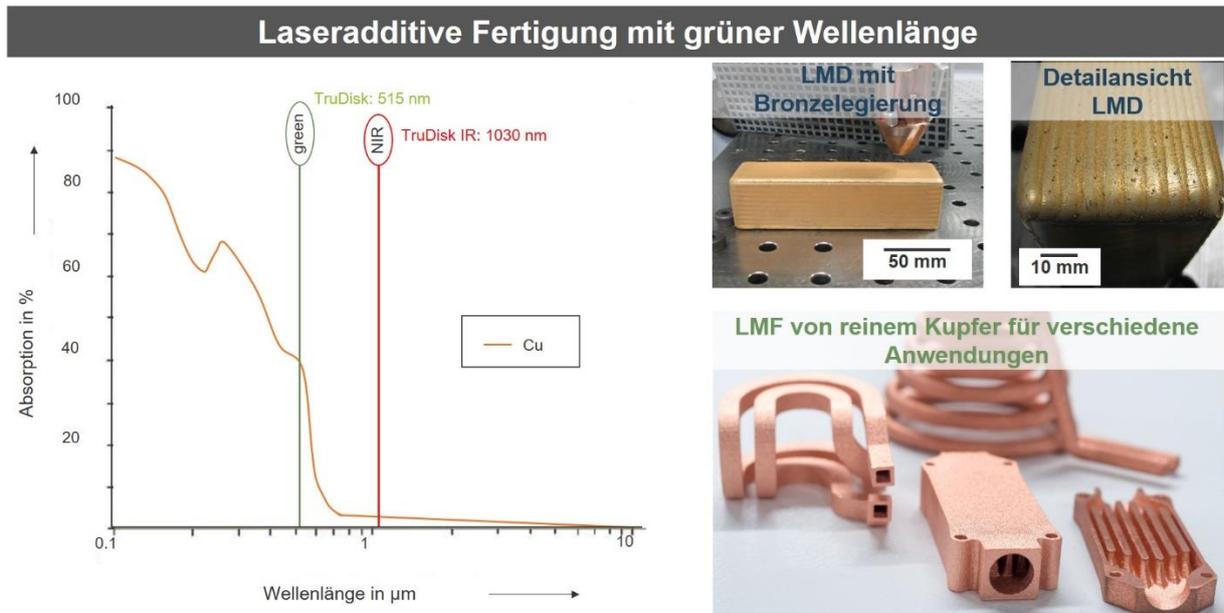


Abb. 1: Links: Absorptionskurve in Abhängigkeit von der Wellenlänge für Kupfer. Rechts: Muster und Beispiele durch AM hergestellte Bauteile.

Durch die Verwendung der grünen (515 nm) Wellenlänge kann die Absorption der Laserstrahlung auf ca. 30 % bei Kupfer erhöht werden, im Gegensatz zu ca. 5 % bei der infraroten (1030nm) Laserstrahlung (Abbildung 1). Besonders bei Bronze- oder Kupferlegierungen kann die grüne Wellenlänge von Vorteil sein, wenn feine Strukturen hergestellt werden müssen oder der Wärmeeintrag minimiert werden soll. Beim pulverbettbasierten Schmelzen (LMF) ist es möglich, Bauteile mit einer Dichte von 99,9 % und einer elektrischen Leitfähigkeit von 101 % IACS herzustellen. Es können Bauraten von 8 bis 16 cm<sup>3</sup>/h für Cu ETP und 17 cm<sup>3</sup>/h für CuCr1Zr erzielt werden. Die ersten Versuche mit einem grünen Laser beim Laserauftragschweißen (LMD) sind durchgeführt. Kupferlegierungen zeigen eine effizientere Bearbeitung bei geringerer Laserleistung als im infraroten Bereich.

# Funktionales Laserfinishing additiv gefertigter PA12-Bauteile

Lukas Eckhardt<sup>1</sup>, Michel Layher<sup>1</sup>, Andreas Hopf<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Markus May<sup>2</sup>, Steven Lachmund<sup>2</sup>, Benjamin Buttler<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ernst Abbe Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena; <sup>2</sup>Faktur GmbH, Göschwitzer Str. 22, 07745 Jena; <sup>3</sup>GOT Gesellschaft für Oberflächentechnik mbH, Konrad-Zuse-Straße 4, 07745 Jena

*Das pulverbasierte Multi Jet Fusion Verfahren (MJF) hat sich seit der Einführung 2016 in der additiven Serienfertigung etabliert. Mögliche Anwendungen von MJF-Bauteilen werden jedoch durch eine prozessbedingt körnige Oberfläche mit Rauheiten von  $R_a > 5 \mu\text{m}$  eingeschränkt. Ziel dieser Forschungsarbeit ist daher die Identifikation und Charakterisierung von Methoden zur Reduzierung der Rauheit sowie zur Anpassung der optischen und haptischen Oberflächeneigenschaften. Im Mittelpunkt steht die Glättung durch Laserstrahlpolieren (LSP). Damit ist es möglich, den PA12-Kunststoff lokal aufzuschmelzen und die Rauheit auf  $R_a < 1 \mu\text{m}$  zu reduzieren. Nachfolgend können zusätzlich Beschichtungsverfahren zum Metallisieren oder Pulverbeschichten eingesetzt werden, um funktionelle Eigenschaften der Bauteiloberflächen anzupassen.*

Das Laserstrahlpolieren von MJF-Bauteilen ist ein umschmelzendes Verfahren, bei dem der verwendete PA12-Kunststoff lokal verflüssigt wird und ausgehend von der Oberflächenspannung eine geschlossene Deckschicht ausbildet. Gegenüber Kugelstrahlen, Gleitschleifen und anderen konventionellen Post-Processing-Methoden bietet das Verfahren viele Vorteile, da es verschleißfrei, schnell, ohne Verbrauchsmittel und weitestgehend geometrieunabhängig arbeitet. Zudem lässt sich die Nachbearbeitung auf definierte Funktionsflächen beschränken.

Im Prozess wird der Laserstrahl mäanderförmig über die Bauteiloberfläche geführt. Durch die Verwendung kleiner Spurbstände entsteht ein Quasi-Linienfokus mit homogener Temperaturverteilung. In Abhängigkeit der Fokuslinienlänge, des Fokusdurchmessers und der Scangeschwindigkeit ist eine Skalierung der Laserleistung und des Spurbstandes notwendig. Aus der Korrelation der genannten Parameter mit den resultierenden Rauheiten lässt sich ein Prozessmodell ableiten, welches die Bearbeitung beliebiger Flächen mit reproduzierbaren Ergebnissen ermöglicht. Im Querschliff laserstrahlpolierter Proben ist eine ca.  $170 \mu\text{m}$  dicke, umgeschmolzene Deckschicht erkennbar, welche die körnige Struktur der Oberfläche zuverlässig schließt. Minimale Rauheiten von  $R_a 0,6 \mu\text{m}$  sind realisierbar. Während der Nachbearbeitung wird die Oberflächenenergie und die Shore-Härte von Probekörpern nicht signifikant verändert. Die Zugfestigkeit nimmt jedoch, vermutlich durch thermisch eingebrachte Spannungen, um durchschnittlich 6% ab.



Abb. 1: Gefinishte Bauteile: a) pulverbeschichtet, b) metallisiert, c) laserstrahlbeschriftet, d) laserstrahltexturiert, e) 3D-laserstrahlpoliert

Potentielle Anwendungen des Verfahrens sind vielfältig. Örtlich begrenztes Laserstrahlpolieren kann u.a. zur Glättung mechanisch belasteter Funktionsflächen oder zur Erstellung von Beschriftungen und Mustern eingesetzt werden. Auch das Aufprägen von Leder- oder Holztexturen auf Freiformoberflächen ist mit Laserstrahlung möglich. Dafür wird die Deckfläche zunächst laserstrahlpoliert und anschließend in mehreren Prozessschritten lokal umgeschmolzen und abgetragen, sodass eine dreidimensionale Struktur entsteht.

Weiterführende Untersuchungen zielen auf die Bauteilfunktionalisierung mithilfe kombinierter Prozessketten ab. Das Laserstrahlpolieren der Deckschicht kann beispielsweise die Homogenität metallischer oder pulverbasierter Beschichtungen verbessern. So sind nicht nur optisch und haptisch modifizierte Oberflächen, sondern auch ableitfähige (ESD-konforme) und mechanisch verstärkte Teile herstellbar.

## Förderhinweis:

Das Verbundvorhaben „FunkFin - Entwicklung einer neuartigen Prozesskette zum funktionalen Oberflächenfinishen 3D-gedruckter Kunststoffteile“ (Förderkennzeichen ZF4039614GM8) wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

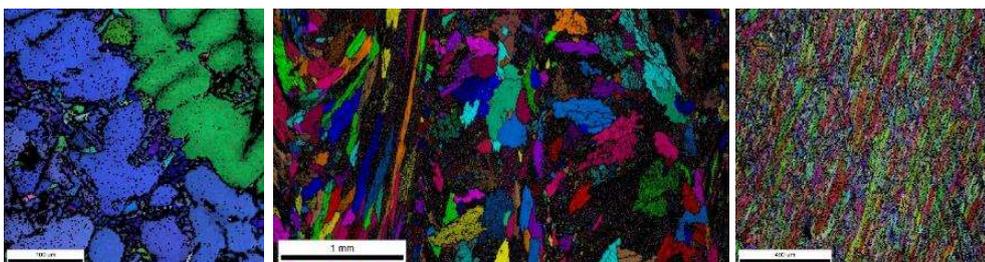
# Laser- und Elektronenstrahlschweißen an konventionell und additiv hergestelltem AlSi10Mg Material

Jan Drechsel<sup>1</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>,  
Paul Hollmann<sup>2</sup>, Horst Biermann<sup>2</sup>, Rolf Zenker<sup>3</sup>

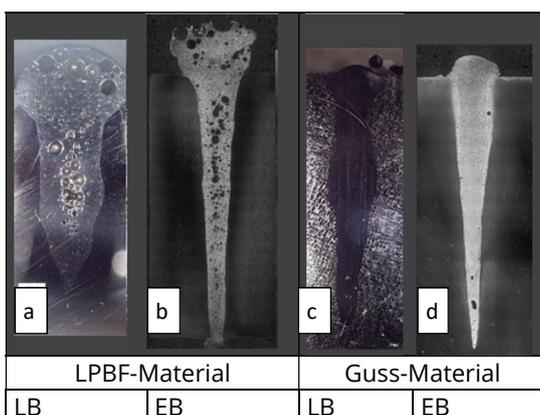
- 1) Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida  
2) TU Bergakademie Freiberg – Institut für Werkstofftechnik, Gustav-Zeuner-Str. 5 09599 Freiberg  
3) Zenker Consult, Johann-Sebastian-Bach-Str. 12, 09648 Mittweida

*Das 3D-Drucken von Bauteilen mittels Laser powder bed fusion (LPBF), auch als Selective Laser melting (SLM) bekannt, eröffnet vollkommen neue Designmöglichkeiten und Fertigungsstrategien. In vielen Bereichen der Luftfahrt- und Automobilindustrie ist die Legierung AlSi10Mg von großem Interesse, da sie als gut schweißbar gilt. Die Schweißergebnisse an Pulver generiertem sowie mit Draht und Elektronenstrahl auftraggeschweißtem und an konventionell hergestelltem Material (Sandguss) zeigen allerdings große Unterschiede in der erreichbaren Einschweißtiefe und bei der Nahtqualität. Insbesondere beim Laserschweißen des LPBF generierten AlSi10Mg-Materials war eine ausgeprägte Porenbildung in den Schweißnähten festzustellen.*

Die Aluminium- AlSi10Mg ist eine weit verbreitete Gusslegierung, die sich auch mit dem LPBF-Verfahren zuverlässig verarbeiten lässt. Aufgrund ihrer nahezu eutektischen Zusammensetzung weist diese Legierung neben den guten mechanischen Eigenschaften auch eine gute Gieß- und Schweißbarkeit auf. Daher wird sie häufig in der Automobil- sowie Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt. Durch die derzeit verfügbare Anlagentechnik ist allerdings die Größe additiv gefertigter (AM) Bauteile auf ca. 350 x 350 x 300 mm<sup>3</sup> begrenzt. Ein weiterer, bedeutender Kostenfaktor ist, neben einer entsprechenden Pulverbereitstellung, die niedrige Baurate im LPBF-Prozess. Dadurch sind in der Regel die Kosten solcher Bauteile höher als bei konventionellen Fertigungsmethoden. Die Größenbeschränkung kann durch das Fügen (Schweißen) von AM-Bauteilen bzw. von AM und konventionell hergestellten Bauteilen überwunden werden. Zudem können AM-Strukturen kosteneffizient gezielt dort eingesetzt werden, wo ein hoher Grad an Komplexität oder Funktionalität für die Anwendung erforderlich ist. Neben dem Vorteil der gestalterischen Freiheit entsteht beim LPBF-Bauprozesses als Folge des sehr lokalen Wärmeeintrags ein sehr feinkörniges Gefüge (Abb. 1, rechts), das eine hohe Festigkeit aufweist. Der in den Untersuchungen verwendete Sandguss wies hingegen ein grobkörniges Gefüge mit zahlreichen Poren auf. Die Schweißuntersuchungen am LHM wurden mit einem 10 kW Monomode Faserlaser (LB) im Geschwindigkeitsbereich von 2 – 10 m/min durchgeführt. Vergleichende



**Abb. 1** Unterschiede in der Mikrostruktur von Guss (links), Elektronenstrahl Draht basiert (Mitte) und Pulver-LPBF hergestelltem AlSi10Mg-Materials (rechts)



Schweißuntersuchungen der TU Bergakademie Freiberg erfolgten mit einer 85 kW Elektronenstrahlquelle (EB). Mit dem Laserstrahl konnten Einschweißstiefen von bis zu 18 mm (Abb. 2, a/c) und mit dem Elektronenstrahl von bis zu 20 mm (Abb. 2, b/d) mit größtenteils sehr hohem Aspektverhältnis realisiert werden. Unabhängig vom Schweißstrahlensystem waren in den Querschliffen bei gegossenem AlSi10Mg-Material oft nur wenige (kleine) Poren zu finden, während beim LPBF-generiertem Material unabhängig von der jeweiligen Schweißstrahlquelle generell viele Poren festzustellen waren.

**Abb. 2** Querschliffe der Blindschweißungen

# Herstellung hybrider Komponenten mittels Laserstrahlschweißen

Ulrich, S.\*; Rosenblatt, M.\*; Pieper, M.\*

Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung, Ernst-Ruska-Ring 3, 07745 Jena

*In diesem Beitrag wird die Herstellung von Hybridbauteilen vorgestellt, welche aus konventionellem Al-Guss und additiv gefertigten Halbzeugen bestehen und mit Hilfe des Laserstrahlschweißens gefügt werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Bestimmung der Schweißbeignung der L-PBF Komponenten (laser powder bed fusion), da hierbei auf die mechanische Vorbereitung der Halbzeuge (Drehen/Fräsen) vor dem Schweißen verzichtet wurde. In diesem Zusammenhang wurde der Einfluss der Prozessparameter auf das Gefüge und die Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von AlSi10Mg untersucht, um das Prozessfeld einzugrenzen.*

Produktionsanlagen zum additiven Fertigen von Bauteilen, z.B. aus Al-Legierungen, werden immer leistungsfähiger. Anwender produzieren bereits jetzt schon Klein- und auch Großserien auf ihren L-PBF-Anlagen. Die Fertigungskosten dieser additiv gefertigten Bauteile werden dabei durch immer neue Methoden weiter reduziert. Oberstes Ziel ist es, das Bauteilvolumen in weniger Schichten zu erzeugen und so die zeit- und kostenintensiven Beschichtungszyklen zu reduzieren. Mit diesem Ansatz kann jedoch nur begrenzt Einfluss auf Kosten und Bauzeit genommen werden, da diese ebenfalls durch die Orientierung des Bauteils im Bauraum beeinflusst werden (breit und flach wenig Zeit, schmal und hoch viel Zeit). Darüber hinaus hat die Baurichtung auch Einfluss auf die Fertigungsgenauigkeit und Oberflächengüte des Bauteils. Eine Alternative ist die pulverbettbasierte Herstellung des Funktionsbereiches, welcher im Anschluss mit dem angrenzenden, konventionell gefertigten Bauteil verbunden wird. Dabei kann der konventionell gefertigte Teil auch deutlich größer sein als der Bauraum der Pulverbettanlage. Für das Fügen können bei metallischen Komponenten Standardschweißverfahren, z. B. das Laserstrahlschweißen, zum Einsatz kommen.

Um jedoch qualitativ hochwertige Schweißnähte an additiv gefertigten Bauteilen herzustellen, ist eine Anpassung der bekannten Prozessparameter für das Laserstrahlschweißen von konventionell gefertigten Bauteilen (Halbzeug) notwendig. Prozessbedingt weisen die L-PBF-Bauteile andere Eigenschaften als konventionell gefertigten Bauteil auf. Am Beispiel der Kombination aus konventionellem Al-Guss und additiv gefertigten Halbzeugen werden die Besonderheiten beim Laserschweißen von Hybridverbindungen vorgestellt. Dabei wurde bei den Schweißversuchen von einer Nahtvorbereitung und von Schweißzusatz abgesehen. Infolge dessen war die Fügezone von inneren (u.a. Porennester) und äußeren (u.a. Nahtunterwölbung und Randkerben) Unregelmäßigkeiten geprägt. Auf die Zusammenhänge zwischen Laser- und Prozessparametern und den resultierenden Nahtfehlern wird in diesem Beitrag schwerpunktmäßig eingegangen. Durch eine Anpassung der Laser- und Prozessparameter, gegenüber rein konventionellen Verbindungen, konnte eine deutliche Reduzierung der inneren und äußeren Schweißnahtfehler erzielt werden.

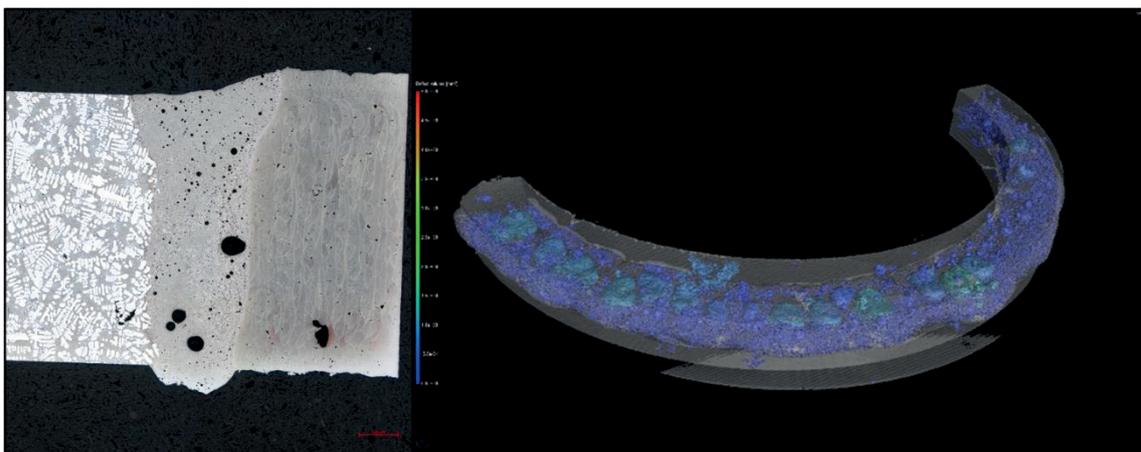


Abbildung 1: Hybridverbindung aus AlSi10Mg links: Querschliff, rechts: µCT-Aufnahme

# Influence of the initial surface roughness on the ablation efficiency of metals

Simon Ruck<sup>1,2</sup>, David K. Harrison<sup>2</sup>, Anjali DeSilva<sup>2</sup>, Simon Dikel<sup>1</sup>,  
Max-Jonathan Kleefoot<sup>1</sup>, Harald Riegel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LaserApplikationsZentrum Hochschule Aalen, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen

<sup>2</sup>Glasgow Caledonian University, G4 0BA Glasgow, UK

Die Laserablation als Verfahren der Präzisionsbearbeitung gewinnt sowohl in den Bereichen der Forschung als auch der industriellen Fertigung an Bedeutung. Insbesondere für industrielle Anwendungen stellt neben den erreichbaren Genauigkeiten die Prozesseffizienz einen wichtigen Faktor dar. Meist werden für Untersuchungen in der Forschung polierte Oberflächen für die Untersuchung des Ablationsprozesses verwendet. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Ablationseffizienz von Metallen bei der Bearbeitung mit gepulster Laserstrahlung in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit. Erste Ergebnisse zeigen Unterschiede zwischen der Bearbeitung mit kurzen Pulsen und ultrakurzen Laserpulsen. Während bei der Bearbeitung mit kurzen Laserpulsen die Ablationseffizienz mit zunehmender Oberflächenrauheit steigt, zeigen ultrakurze Laserpulse ein anderes Verhalten. Es konnten zwei Regime identifiziert werden. So wurde in einem ersten Bereich eine Abnahme der Ablationseffizienz bis zu einer gewissen Rauheit festgestellt, bevor wieder eine Zunahme der Effizienz stattfindet. Weiterhin lässt sich eine Abhängigkeit der Ablationseffizienz von der Einzelpulsenergie bzw. der mittleren Leistung bei konstanter Repetitionsrate erkennen.

Laser ablation is gaining importance in the areas of research and industrial manufacturing concerning micro machining technologies. In particular, for industrial applications the process efficiency is an important factor in addition to the achievable accuracy. Most investigations in research according the ablation efficiency are done with polished surfaces samples. The aim of this work is to investigate the ablation efficiency of metals during processing with pulsed laser radiation as a function of the surface roughness. First results show differences between laser ablation with short pulses and ultrashort laser pulses. While the ablation efficiency increases with an increasing surface roughness for short laser pulses, ultrashort laser pulses show a different behaviour. Here, two regimes could be identified. In the first regime, a decrease in ablation efficiency was observed up to a certain roughness, before an increase in efficiency takes place again. Further, we observed a dependency between the maximum achievable ablation efficiency and the adjusted single pulse energy, respectively average laser power at a fixed pulse repetition rate.

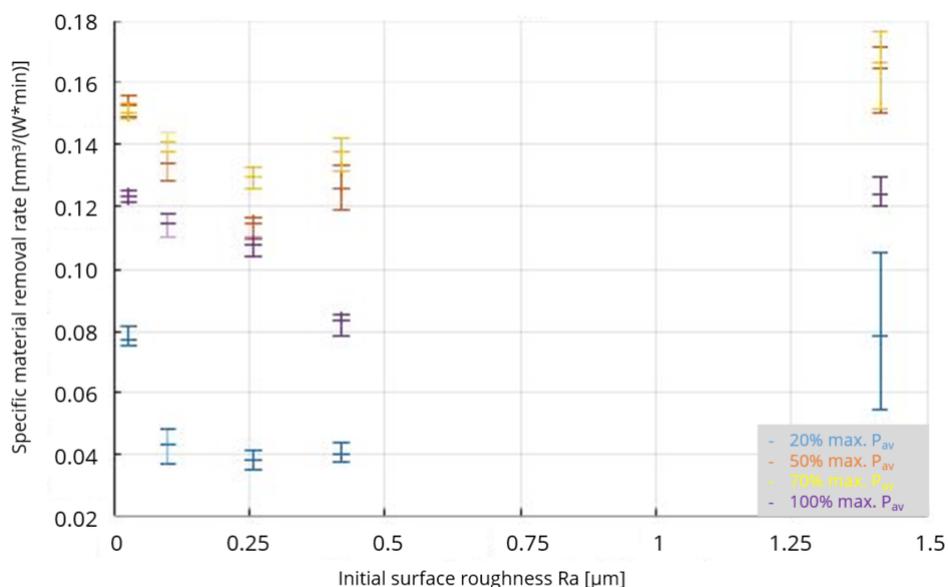


Fig. 1: Specific material removal rate depending on the initial surface roughness

# Direkte, laserbasierte Herstellung von Mikrolinsenarrays aus Glas

Martin Kahle, Daniel Conrad, Stefan Fricke

ifw Jena - Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH, Ernst-Ruska-Ring 3,  
07745 Jena

*Mikrolinsenarrays aus Glas sind moderne optische Bauelemente, die durch ihre Komplexität die Funktion vieler größerer Linsen gleichzeitig übernehmen können. Damit lassen sich optische Anordnungen miniaturisieren und leichter machen. Die Herstellung solcher Elemente ist aber insbesondere bei mittleren und kleinen Stückzahlen eine Herausforderung. Am ifw Jena werden daher zwei direkte Herstellungsmethoden solcher Elemente untersucht: Der Laserabtrag mit Ultrakurzpulslasern sowie der Abtrag und die Politur mit CO<sub>2</sub>-Lasern. Die Experimente zeigen eine gute Homogenität der Linsen sowie eine hohe Prozessgeschwindigkeit.*

Das fortschreitende Verständnis der Optik und die Forderungen des Marktes nach Platz- und Gewichtsersparnis bei optischen Geräten begünstigen den Trend zu Freiformoptiken und miniaturisierten optischen Bauelementen. Diese optischen Elemente erlauben die Lösungen von optischen Aufgaben, die zuvor eine Vielzahl sphärischer Linsen erforderten. Durch den Einsatz von komplexeren Optiken lassen sich Abbildungsfehler vermeiden, Masse und Gewicht einsparen und auch völlig neue Effekte erzielen, wie zum Beispiel durch Mikrolinsenarrays (MLA) die quasi-3D-Aufnahme in Lichtfeldkameras oder die Homogenisierung von Laserstrahlen.

Von tragbaren Anwendungen in Konsumgütern wie Smartphones, mobilen Messgeräten und Diagnosegeräten bis hin zu Weltraumanwendungen bringt die Integration mehrerer Funktionen in einem optischen Element enorme Vorteile. Neben der Einsparung von Gewicht und Platz sind solche Optiken mechanisch weit weniger empfindlich, da weniger Funktionsteile gegeneinander verrutschen können.

Die Fertigung von MLA aus Glas ist eine technische und wirtschaftliche Herausforderung, insbesondere für kleine und mittlere Stückzahlen. Aufgrund der spezialisierten Anwendung von MLA in High-Tech-Produkten werden aber im Allgemeinen kleine Stückzahlen bis hin zu Einzelstücken benötigt. In diesem Fall ist die Herstellung von Masken für UV-Lithografie unwirtschaftlich. Laserverfahren bieten die Möglichkeit, durch den Abtrag und die Politur von optischen Gläsern direkt Mikrolinsenarrays in Glas herzustellen. Zudem sind dabei weit weniger Prozessschritte nötig, was Zeit und Kosten spart. Am ifw Jena wird daher mit verschiedenen Laserverfahren untersucht, wie sich Mikrolinsenarrays direkt herstellen lassen, sowohl mit Ultrakurzpulslasern als auch mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlen. Ein innovativer Nanosekunden-CO<sub>2</sub>-Laser wird für den Abtrag von Gläsern mit hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten eingesetzt. Die anschließende Laserpolitur soll die vollständige Bearbeitung in nur einer Aufspannung ermöglichen. Im Vortrag werden die aktuellen Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt. Erste Experimente zeigen, dass sich MLA mit guter Homogenität herstellen lassen. Dabei sind im Gegensatz zu üblichen Reflow-Verfahren kurze Bearbeitungsdauern im Bereich von Minuten und sehr große Linsendicken von hunderten Mikrometern möglich. Im Fokus der Experimente stehen Borosilikat- und Quarzglas.

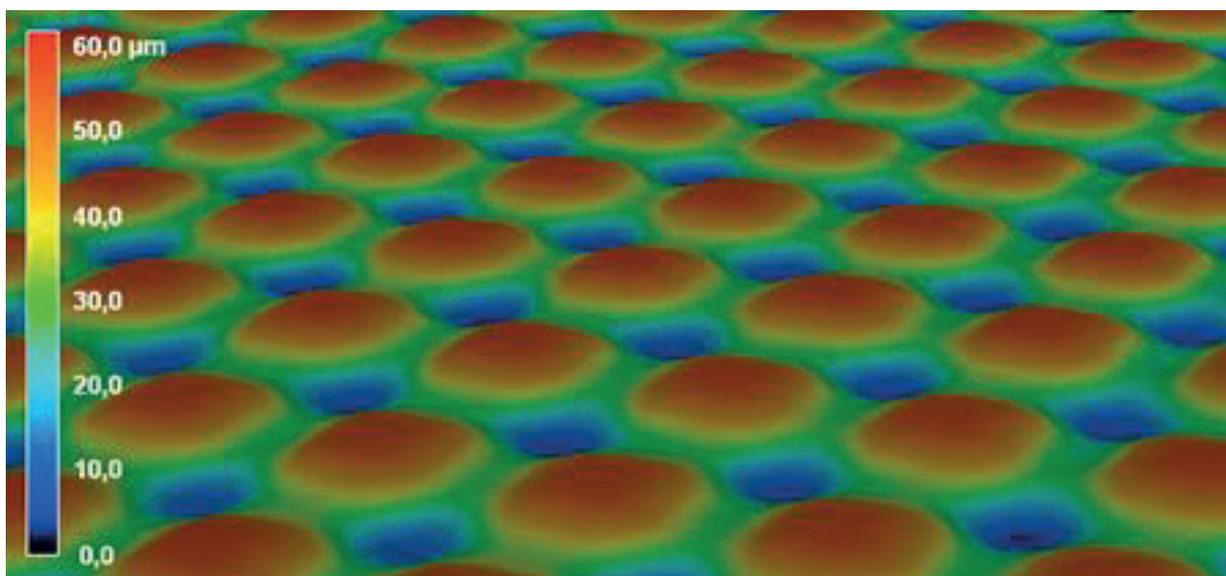


Abb. 1: Oberflächenprofil eines Mikrolinsenarrays, das durch direkten Abtrag und Politur in Borosilikatglas gefertigt wurde; aufgenommen per Laser-Scanning-Mikroskop, Linsenabstand 400 µm.

# Herstellung von Mikrostrukturen zur Beeinflussung des Bahndrehimpulses elektromagnetischer Strahlung

Sebastian Büttner, Michael Pfeifer, Steffen Weißmantel

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

*Am Laserinstitut Hochschule Mittweida wird seit mehreren Jahren zur laserbasierten Herstellung mikrooptischer Bauelemente geforscht. Mit dem verwendeten Maskenprojektionsverfahren können, je nach Maskenform und Bewegungsregime, unterschiedliche optisch wirksame Strukturen erzeugt werden. Durch die Entwicklung zweier neuer Verfahrensvarianten der Fluorlaser-Mikrostrukturierung wird die Herstellung von sogenannten Mikro-Spiralphasenplatten und Fork-Gittern ermöglicht. Die Verfahrensvarianten sind dabei sehr flexibel bezüglich der realisierbaren Strukturgeometrie. Mit einem Satz Masken können Spiralphasenplatten mit unterschiedlichen Konfigurationen hergestellt werden. Für die Erzeugung von Fork-Gittern, dem beugungsoptischen Pendant der Spiralphasenplatten, müssen spezielle Kalziumfluorid-Masken angefertigt werden, was ebenfalls mittels Fluorlaser-Mikrostrukturierung erfolgt.*

Die Charakterisierung elektromagnetischer Strahlung erfolgt in bekannter Weise über deren Welleneigenschaften und den damit verbundenen Größen Wellenlänge, Amplitude, Phase und Polarisation. Im Bereich der optischen Datenübertragung werden optische Signale derart beeinflusst, dass sie sich in mindestens einer dieser Eigenschaften unterscheiden und damit gleichzeitig übertragen werden können. Diese Bündelung der Signale zur zeitgleichen Übertragung wird als Multiplexing bezeichnet. Die dafür verwendeten Methoden sind bereits so weit entwickelt, dass die Kapazität von Glasfasern nahezu ausgeschöpft ist. Neben den genannten Eigenschaften besitzen Photonen einen Impuls und potenziell auch einen Drehimpuls. Letzterer setzt sich aus dem Eigendrehimpuls (engl. spin angular momentum (SAM)) und dem Bahndrehimpuls (engl. orbital angular momentum (OAM)) zusammen. Der Eigendrehimpuls resultiert aus der (zirkularen) Polarisation der Photonen, der Bahndrehimpuls aus einer azimuthalen Phasendifferenz. Werden optische Signale in ihrer Phase mit einer solchen azimuthalen Abhängigkeit moduliert, kann dem Signal im Umkehrschluss ein definierter Bahndrehimpuls aufgeprägt werden. Dies ermöglicht die gleichzeitige Übertragung mehrerer Signale die sich in ihrem Bahndrehimpuls unterscheiden und stellt damit eine neue Multiplexing-Methode (OAM-Multiplexing) dar, die die Kapazität von Glasfasern enorm steigern kann.

Durch die von uns getätigten Entwicklungen im Bereich der Fluorlaser-Mikrostrukturierung sind wir in der Lage, Strukturen herzustellen, mit denen der Bahndrehimpuls gezielt beeinflusst werden kann. Die Verwendung einer speziellen Maskenbewegungseinrichtung erlaubt die Herstellung von Mikro-Spiralphasenplatten mit unterschiedlichen Konfigurationen (topological charge (TC), Drehsinn, Modulationstiefe). Dabei können die entsprechenden Konfigurationen in einem großen Bereich allein steuerungstechnisch beeinflusst werden. Dies ist vor allem für die individuelle, aber auch für die industrielle Herstellung von großer Bedeutung, ebenso wie die Strukturierungszeit, die im Bereich weniger Sekunden liegt. Das beugungsoptische Pendant zu den Spiralphasenplatten sind die sogenannten Fork-Gitter. Ausgehend von der berechneten Gittergeometrie, erfolgt deren Herstellung mit dem Anfertigen einer entsprechenden Kalziumfluoridmaske. Die Strukturierung des Kalziumfluoridsubstrates erfolgt dabei ebenso mit dem Fluorlaser. Aufgrund der geringeren Fluenz in der Maskenebene kann das strukturierte Substrat selbst als Maske eingesetzt werden. Durch das Einbringen mehrere Maskengeometrien auf einem Substrat bietet diese Variante ebenfalls eine gewisse Flexibilität. Prinzipiell können damit beide Verfahrensvarianten einen Beitrag zur Entwicklung neuer Lösungsansätze und Hardwarekomponenten zur Erhöhung der Kapazität der Transportmedien im Bereich der optischen Datenübertragung leisten. Durch die Kombination unterschiedlicher Strukturen auf einem Substrat können neue Konzepte für optische Multiplexer umgesetzt und überprüft werden.

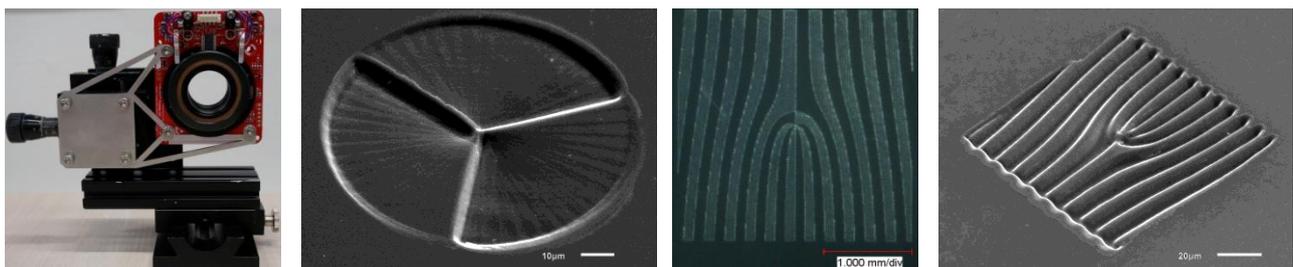


Abb. 1 - 4 (v.l.n.r.): Doppelrotationsachse zur Herstellung von Spiralphasenplatten, Spiralphasenplatte hergestellt in Quarzglas Corning 7980, strukturierte Kalziumfluoridmaske und damit in Quarzglas hergestelltes Fork-Gitter.

# Optimized Laser Cutting Processes and System Solutions for Separation of Ultra-Thin Glass for OLED Lighting and Display Applications

Rene Liebers

3D-Micromac AG, Technologie-Campus 8, 09126 Chemnitz

*For some years now, laser cutting processes based on filament technology with ultrashort pulse (USP) lasers have been increasingly adopted in industrial applications. The main reasons for this are the good edge quality that can be achieved with simultaneous easy automation and free-form capability. This ability to be automated is of critical importance, especially for applications that target the mass market with their end products. However, the real advantage of the technology comes from its almost unlimited free-form capability. In addition to established manufacturing processes for glasses of medium thickness from 0.2-2 mm, an increasing number of applications with ultra-thin glasses of 30-100  $\mu\text{m}$  are entering the market. These applications also require further development of the process and fab technology.*

*This presentation covers the possibilities of laser technology based on applications for OLED-based lighting and glass components in the display area.*

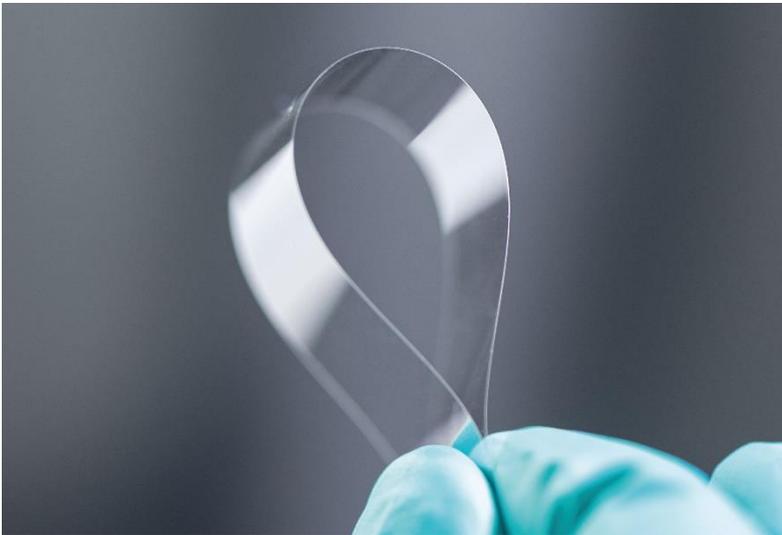


Abb. 1: Laser cut thin glass machined with ultrashort pulse laser, glass thickness below 30  $\mu\text{m}$ .

# Long-term-stable 120-W, 220- $\mu$ J, 120-fs Thulium-based fiber-CPA for materials processing

Christian Gaida<sup>1</sup>, Fabian Stutzki<sup>1</sup>, Martin Gebhardt<sup>2,3</sup>, Tobias Heuermann<sup>2,3</sup>, Sven Breilkopf<sup>1</sup>, Tino Eidam<sup>1</sup>, Jan Rothhardt<sup>2,3,4</sup>, Jens Limpert<sup>1,2,3,4</sup>

1. Active Fiber Systems GmbH, Ernst-Ruska-Ring 17, 07745 Jena

2. Institute of Applied Physics, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Albert-Einstein-Str. 15, 07745 Jena

3. Helmholtz-Institute Jena, Fröbelstieg 3, 07743 Jena

4. Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena

*We demonstrate a thulium-based fiber amplifier delivering pulses with <120 fs FWHM duration at up to 228  $\mu$ J of pulse energy at a center wavelength of 1940 nm and 500-kHz repetition rate. Due to the excellent long-term stability the system is ideally suited for an integration in all sorts of material processing machines.*

Addressing certain wavelength regimes can be essential for many materials processing applications. Some machining processes in certain materials, such as silicon can potentially benefit from near infrared laser sources with central wavelengths above the classical 1- $\mu$ m range. Tm-based fiber lasers have proven to be promising and relatively straightforward candidates for the efficient generation of high-average- and peak-power ultrafast laser radiation at 2- $\mu$ m wavelength [1,2]. Femtosecond pulses could already prove themselves as a suitable tool to induce permanent material modification in the highly relevant semiconductor silicon [3,4]. Here we demonstrate a fiber-based CPA system delivering unprecedented laser parameters with excellent long-term stability. The output pulses have a FWHM-duration of <120 fs and contain up to 228  $\mu$ J of pulse energy at a center wavelength of 1940 nm and a pulse repetition-rate of ~500kHz.

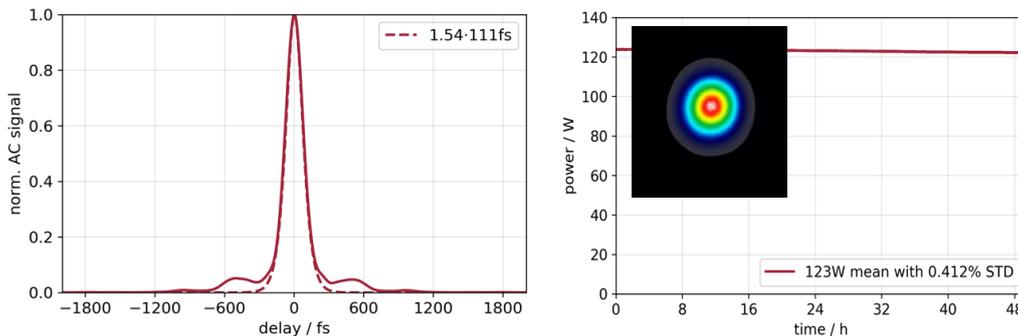


Fig. 1: Left: Second-harmonic autocorrelation function of the output pulse corresponding to a pulse-duration of <120fs (111fs, assuming sech<sup>2</sup>-shape) at 228  $\mu$ J pulse energy. Right: Average-power measurement over >48h operation time. The inset shows the output beam at the highest power level.

A typical autocorrelation trace at this pulse energy is depicted in Fig.1 (left) indicating good pulse quality. Under the conservative assumption, that >70% of the pulse energy are confined in the main feature, the peak power is calculated to be >1.3GW. The laser system has been continuously operated and characterized over several days at 1 MHz pulse repetition rate and an average output power of 123W. Excellent long-term stability was achieved with an average power fluctuation of <0.5% RMS over 48 hours of operation as is shown in Fig.1 (right). The Tm-doped photonic-crystal fiber and the employed grating-compressor deliver near-diffraction-limited output ( $M^2 < 1.2$ ) as verified during earlier work [2]. The inset in Fig.1 (right) shows the Gaussian-like beam profile after pulse compression at the full average power. These output characteristics together with the excellent long-term stability constitute a unique laser system, which is ideally suited as a driving source for demanding scientific and industrial applications.

[1] C. Gaida *et al.*, Opt. Lett. **41**, 4130-4133 (2016).

[2] C. Gaida *et al.*, Opt. Lett. **43**, 5853-5856 (2018).

[3] A. Wang *et al.* Phys. Rev. Res. **2**, (2020).

[4] M. Chambonneau *et al.*, Phys. Rev. Appl. **12**, 1 (2019).

# Effiziente Impulskompression im industriellen Kontext mittels Multipasszellen

Kilian Fritsch, Christian Franke, Oleg Pronin

Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043  
Hamburg Spin-off Projekt: *n2-Photonics*

*Um Impulsdauern kürzer als 200 fs im industriellen Maßstab kosteneffizient nutzbar zu machen, entwickeln wir ein Impulskompressionsmodul für gängige Industrielaser. Eingangssparameter von bis zu 100 W Durchschnittsleistung bei 200  $\mu$ J Impulsenergie sollen kurzfristig mit über 90 % Transmissionseffizienz umgesetzt werden.*

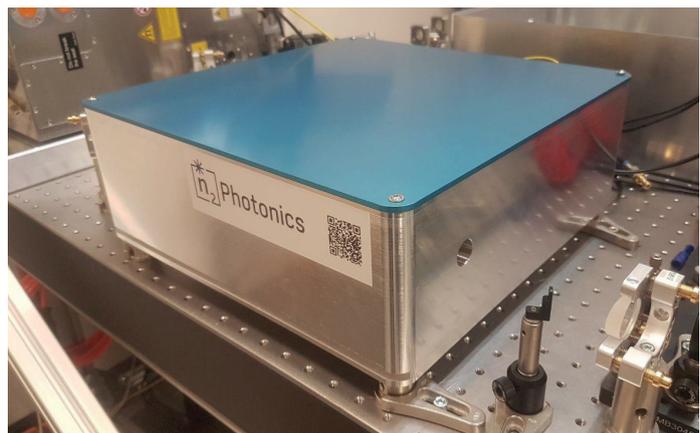
*Keywords: Impulskompression, nichtlineare Optik, Ultrakurzpulslaser, Multipass Zelle*

---

Hochleistungslaser sind aufgrund der Emissionsbandbreite der meist verwendeten Yb-dotierten Verstärkerkristalle auf etwa 250 fs Impulsdauer begrenzt. Nachgeschaltete, externe Impulskompressoren können zum einen das Frequenzspektrum des Laserimpulses mittels Selbstphasenmodulation erweitern und zum anderen durch anschließende Kompensation der entstandenen Phasenschwankung die Impulsdauer verkürzen. Alternativ zu faserbasierten Systemen lässt sich der Prozess auch in einer Multipassanordnung im freien Strahl umsetzen [1]. Neben der Impulskompression zu unter 20 fs [2] wurde auch die Skalierbarkeit der Methode bis zu einer Durchschnittsleistung von 0,5 kW bereits nachgewiesen [3]. Die Technik ist überaus tolerant gegenüber äußeren Einflüssen. So arbeitet die Frequenzverbreiterung wesentlich stabiler und benötigt keinerlei Wartung im Gegensatz zu konkurrierenden Technologien. Die Multipassanordnung erfüllt deshalb die Anforderungen von Industrieanwendern. In diesem Konferenzbeitrag präsentieren wir die kommerzielle Umsetzung dieser Technologie, an der wir als Ausgründung „*n2-Photonics*“ aus dem Lehrstuhl für Lasertechnologie und Spektroskopie von Prof. Pronin der Helmut-Schmidt-Universität arbeiten.

Der erste Prototyp (siehe Bilder) verarbeitet bis zu 200  $\mu$ J Impulsenergie bei 100 W Durchschnittsleistung. Ziel ist die Kompression von 200 fs zu sub-45 fs Impulsen. Bei über 90 % Transmissionseffizienz entspricht dies einer vierfachen Spitzenleistung. Sowohl Strahlagenstabilität und Strahlqualität werden dabei nicht beeinträchtigt. Die vielfältigen Anwendungsgebiete solcher Impulsparameter erstrecken sich von der Mikrobearbeitung bis hin zur Multiphotonenmikroskopie in Biologie und Medizin.

Das Projekt wird vom EXIST-Forschungstransfer des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert.



*Bild links:* Rendering des Konstruktionsmodells. *Bild rechts:* Erster voll funktionsfähiger Laboraufbau.

## Referenzen

- [1] J. Schulte; T. Sartorius et al. (2016): Nonlinear pulse compression in a multi-pass cell. In *Opt. Lett.* 41 (19), pp. 4511–4514. DOI: 10.1364/OL.41.004511.
- [2] K. Fritsch; M. Poetzlberger et al. (2018): All-solid-state multipass spectral broadening to sub-20 fs. In *Opt. Lett.* 41 43 (19), pp. 4643–4646. DOI: 10.1364/OL.43.004643.
- [3] P. Russbuedt; J. Weitenberg et al. (2019): Scalable 30 fs laser source with 530 W average power. In *Opt. Lett.* 44 (21), p. 5222. DOI: 10.1364/OL.44.005222.

# Erzeugen von leitfähigen Strukturen auf Kunststoffoberflächen durch Laserstrahlaktivierung

Michael Seiler<sup>1</sup>, Andreas Knauff<sup>1</sup>, Andrea Barz<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Andrés Fabián Lasagni<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

<sup>2</sup>Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, 01062 Dresden

<sup>3</sup>Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, 01277 Dresden

Die Entwicklung von smarten Devices und Wearables erfordert individuelle Leiterstrukturen und leichte Elektronikbauteile. Die Schaffung von leitfähigen Strukturen auf bisher ungenutzten Flächen wie Gehäuseteilen ist ein wichtiger Entwicklungsschritt zur Reduzierung von Gewicht und Bauraumgröße. Der Inhalt dieses Artikels beschäftigt sich mit einem laserbasierten Verfahren, das für spritzgegossene Kunststoffe verwendbar ist. Die jeweilige Oberfläche wird laserstrukturiert, danach in wässriger Lösung bekeimt und im Anschluss stromlos verkupfert. Für eine erfolgreiche und homogene Verkupferung sind die Laserparameter und die Parameter der Nasschemie von entscheidender Bedeutung. Die Abbildung 1 zeigt eine Prozessmatrix mit 5x5 Feldern. Links ist das Ergebnis nach der Bekeimung zu sehen und rechts daneben die leitfähigen Strukturen nach der Verkupferung.

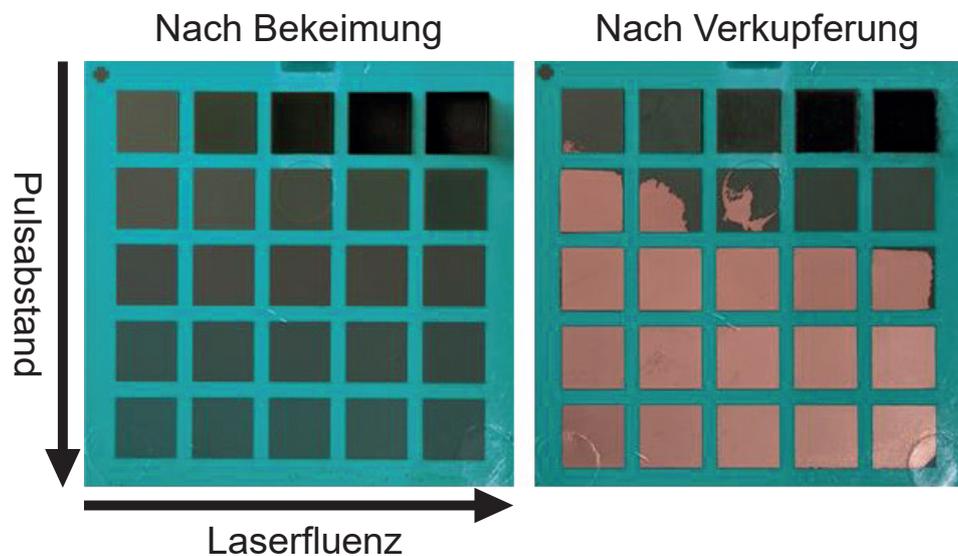


Abbildung 1: Prozessmatrix nach der Bekeimung (links) und nach dem stromlosen Verkupfern (rechts) in Abhängigkeit der Laserfluenz und des Pulsabstand

# Surface Quality of Laser Rod End melted Shape-Memory Nitinol Preforms

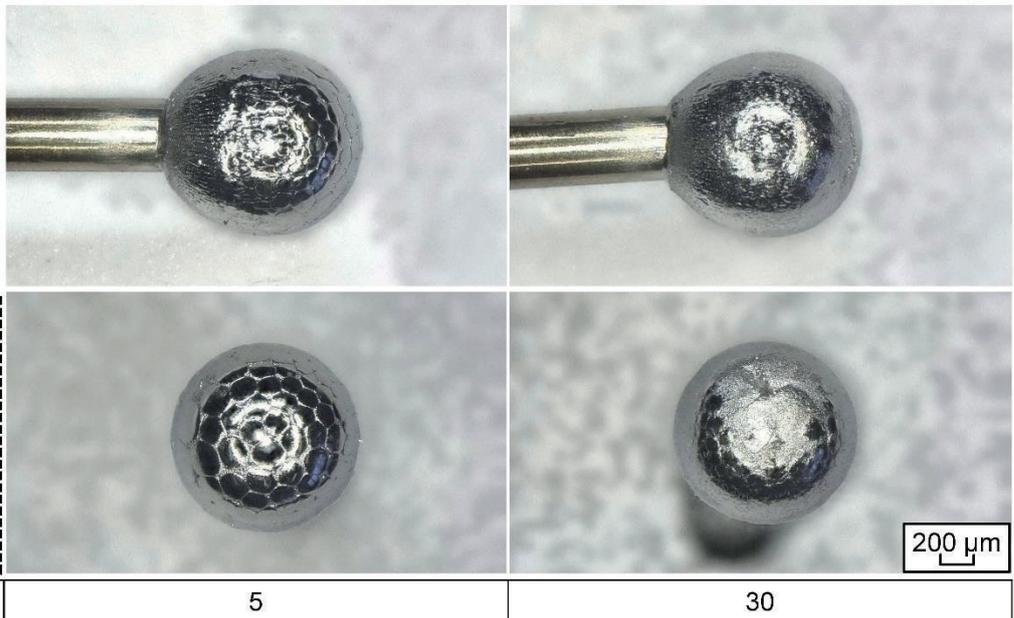
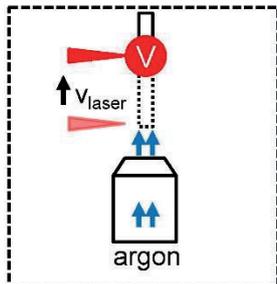
Yang Lu, Tim Radel

Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, Klagenfurter Str. 5, 28359 Bremen

The shape-memory Nitinol as a nickel-titanium alloy is widely used in actuator and medical applications. However, the connection of a flange to the rod is a critical point. Therefore, laser rod end melting enables material accumulation to generate a preform at the end of a rod, followed by die forming, so that the flange can be generated. This process has been successfully applied on 1.4301 steel. This study is aimed to investigate laser rod end melting of shape-memory Nitinol regarding the resultant surface quality of the preforms. The results show that spherical preforms can be generated without visible surface discoloration due to oxidation. By using different scan rates, different solidification conditions occur which lead to significantly different surface structures. These findings show that laser rod end melting can principally be applied on Nitinol to generate preforms for flanges whereby the surface quality depends on the solidification conditions.

**process parameter**

wavelength 1070 nm  
 beam size 55 μm  
 material Nitinol  
 rod diameter 500 μm  
 laser power 90 W  
 scan track 5 mm  
 gas argon, 5 ls/min



Lu 2021

BIAS ID 201042

Figure 1: Surface structures of Nitinol preform at different scan rates

# High-power fiber lasers: challenges and perspectives in power scaling

Andreas Tünnermann

Friedrich Schiller University Jena, Institute of Applied Physics, Abbe Center of Photonics,  
Albert-Einstein-Str. 15, 07745 Jena

---

In the past years rare-earth-doped fiber lasers have emerged as an attractive and power scalable solid-state laser concept due to the outstanding thermo-optical properties of an actively doped fiber. Using advanced fiber designs, in continuous-wave (cw) operation output powers exceeding the 10 kW-level with diffraction-limited beam quality have been demonstrated. In the pulsed regime average powers in the order of several hundred Watt even for few cycle pulses based on fiber lasers have been reported.

However, power and energy scaling of cw and pulsed single-mode fiber lasers and amplifiers are restricted due to nonlinear pulse distortions, which are enhanced by the large product of light intensity and interaction length inside the fiber core. In addition, transverse mode instabilities are observed, which degrade the beam quality emitted by high-power fiber laser systems once a certain average power threshold has been reached. Most recently, strategies have been developed to mitigate or even, ideally, to overcome these limitations – enabling a further power scaling of fiber lasers and amplifiers. These strategies are based on a combination of advanced large mode area fiber designs and coherently coupled multi-channel laser and amplifier architectures.

In this contribution the state of the art of science and technology in fiber lasers and amplifiers is reviewed. The prospects for future developments using advanced fiber designs in combination with modern laser and amplifier architectures are discussed.

# Multi beam micro processing with high power ultrashort pulsed laser for printing and embossing tools

S. Bruening<sup>1</sup>, K. Du<sup>2</sup>, A. Gillner<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Schepers GmbH & Co. KG, Karl-Benz-Str. 7, 48691 Vreden, Germany

<sup>2</sup>EdgeWave GmbH, Carlo-Schmid-Str. 19, 52146 Würselen, Germany

<sup>3</sup>Fraunhofer ILT, Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Germany

Micro structuring of surfaces with ultrashort pulsed lasers is of great interest for various applications, e. g. for the tooling industry, the printing industry and for consumer goods. Despite of today's availability of high power USP lasers (up to several hundred watts), it is still a challenge to structure large surface areas, as required on embossing cylinders, within an acceptable processing time for roll-to-roll production. In this contribution, a high compact ps-laser with repetition rates of up to 8 MHz and an average power of 500 W was distributed into 16 parallel beamlets by a diffractive optical element (DOE). The power was controlled by one single acousto optical modulator per beamlet. The beam array was focused on a cylinder surface with spot sizes of 13  $\mu\text{m}$  and a distance of 20  $\mu\text{m}$  from spot to spot.

Integrated in an ultra-high precision cylinder engraving system, the 16 spots were synchronized with a precision of  $< 1 \mu\text{m}$ . The beam delivery with the multi spot array could be actively positioned with a precision of  $\pm 200 \text{ nm}$  at engraving widths of 3 m. Between the tailstocks, the cylinder was turning with an axial and radial precision of  $< 1 \mu\text{m}$  at turning speeds of up to 4000 RPM and respectively moderate surface speeds of 20 m/s. In a temperature stabilized location, the precision is constant in order to texture microstructures on large surfaces even with processing times of several days.

The typical layer based micro processing method was enhanced to a machining technology in which 8 layers could be processed within one path. According to an 8-bit data set, one modulator per channel individually controlled the fluence of each spot from pixel to pixel. In consideration of the large area of e.g. 3 m<sup>2</sup> (a cylinder with 3 m engraving width and 1 m circumference) the data set with a resolution of 5  $\mu\text{m}$  reached the 4 GB limit of Windows based programs. The data flow was switched to an unlimited big TIF based system.

The ablation rate was investigated by ablating rotogravure cells on copper surfaces. At surface speeds of 10 m/s and a resolution of 5080 dpi, a layer of 500 nm per spot was removed and an ablation rate of up to 27 mm<sup>3</sup>/min was achieved. Different functional surface geometries have been realized on an embossing roller as a master, which is used for the replication of the structures in roll-to roll processes. With this approach functional structures as e.g. reduction in friction, improved soft touch or light guiding elements can be generated on large surfaces within short processing times.

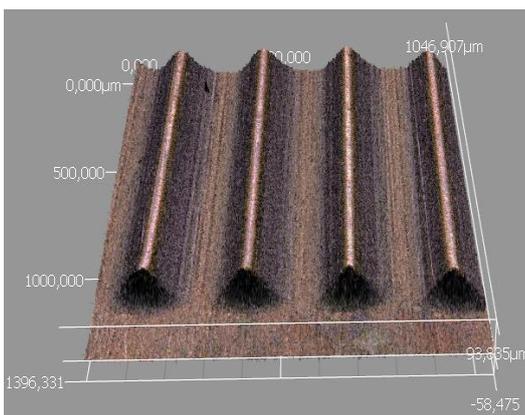


Fig. 1: Fresnel lens, height: 35 $\mu\text{m}$

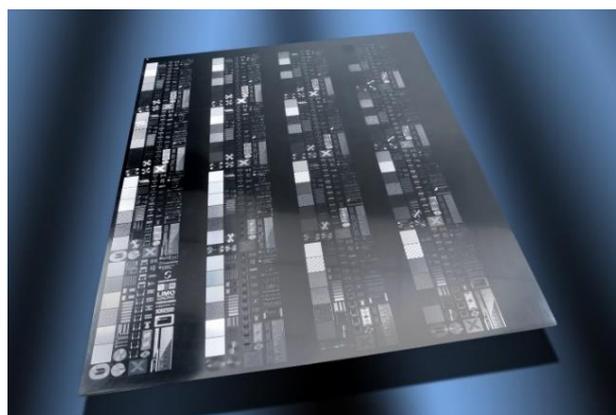


Fig. 2: Large embossing plate (1m x 1,2m) structured multi beam technology

# Beam shaping and splitting with diffractive optics for high performance laser scanning systems

Thomas Mann<sup>(1)</sup>, Holger Schlüter<sup>(1)</sup>, Florian Merkt<sup>(1)</sup>, Felix Lange<sup>(1)</sup>, Alex Skliar<sup>(2)</sup>,  
Natan Kaplan<sup>(2)</sup>, Stephan Eifel<sup>(3)</sup>, Olga Chemerenko<sup>(3)</sup>, Patrick Gretzki<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>SCANLAB GmbH, Siemensstr 2a, 82178 Puchheim, Germany

<sup>(2)</sup>Holo/Or Ltd., 13B Einstein Street, 7403617 Ness Ziona, Israel

<sup>(3)</sup>Pulsar Photonics GmbH, Kaiserstraße 100, 52134 Herzogenrath, Germany

*Diffractive optical elements (DOEs) enable novel high performance and process-tailored scanning strategies for galvanometer-based scan heads. Here we present several such concepts integrating DOEs with laser scanners and the respective application use cases. Beam shaping DOEs providing a homogeneous fluence over a custom defined profile, such as a rectangular Top-Hat, enable increased process quality in Laser-induced Forward Transfer (LIFT) compared to the Gaussian beam of the laser source. We show that aberrations which occur over the necessary large wafer-size image field can be eliminated through the use of a synchronous XY-stage motion. Another application that benefits from the use of DOEs is laser drilling. Drilling in display and electronics manufacturing demands high throughput that can only be achieved through the use of beam splitting DOEs for parallel processing. To this end, the joint MULTISCAN project is developing a variable multi-beam tool capable of scanning and switching each individual beamlet for increased control.*

Laser scanning with a DOE shaped beam is limited in terms of the usable image field of the F-Theta scan lens. At the image field extremities, corresponding to large galvo-mirror deflection angles, distortion of the intensity profile occurs, as shown in Fig. 1(a). Wavefront errors and clipping of the higher diffraction orders by the F-Theta scan lens can also lead to significant distortion. This is particularly problematic in micro-electronics applications employing LIFT, for example, where wafer sizes currently reach up to 6". To overcome this, a synchronous XY-stage motion can be integrated to reduce the used image field size, as shown in Fig. 1(b). Additional benefits include an increase in overall process speed due to the combined motion, elimination of stitching errors and availability of shorter focal length F-Theta lenses giving smaller focal spots.

Beam-splitting DOEs are required for high power ultrafast lasers to divide the pulse energy across the beamlets and avoid excessive fluences on the target material that lead to undesired thermal effects, such as a heat affected zone (HAZ) or glass fracturing. Drilling in display and electronics manufacturing, however, requires additional flexibility in the form of positioning and switching of the individual beamlets during processing. For this, the multi-beam engine, as shown in Fig. 2, was developed and has both these features integrated into the unit. By combining with a synchronous XY-stage, throughput is maximised providing drill rates of over 10,000 per second with accuracy on the order of microns for multi-beam operation.

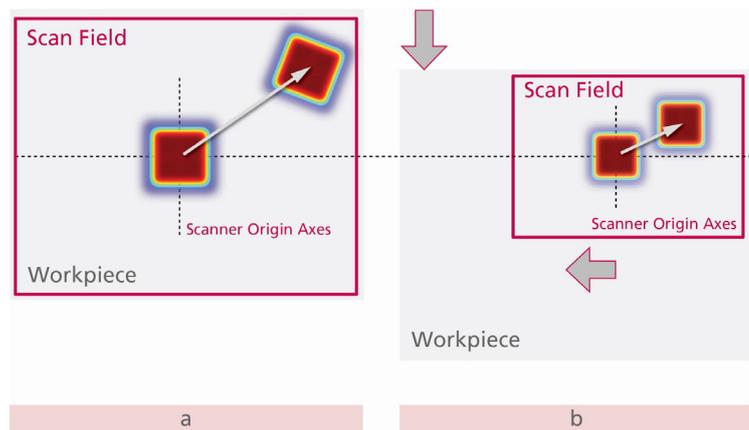


Fig. 1: Laser scanning with a Top-Hat beam shaping DOE; Warping occurs at image fields extremities (a) and can be compensated by a synchronous motion of an XY-stage to limit the scan field size (b). The smaller focal length required in (b) also results in a smaller diffraction limited spot.

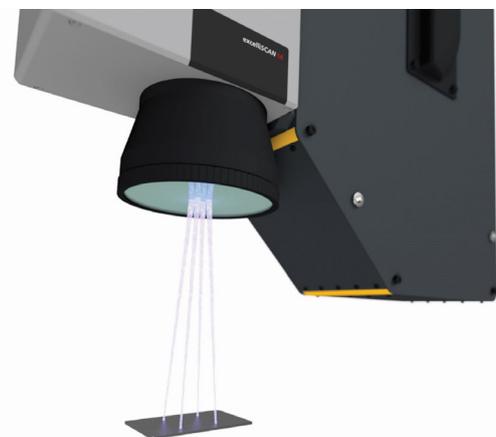


Fig. 2: Multi-beam engine developed in the MULTISCAN project for parallel processing. Each individual beamlet can be positioned within a small radius and switched on and off.

# Qualitätsoptimierter Hochrateabtrag von Werkzeugstahl und Hartmetall mittels ultrakurzer Laserpulse im Burstbetrieb

Christian Kreisel<sup>1</sup>, Tommy Knebel<sup>1</sup>, Ronny Menzel<sup>1</sup>, Daniel Metzner<sup>2</sup>, Peter Lickschat<sup>2</sup>,  
Steffen Weißmantel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ACSYS Lasertechnik GmbH, Leipziger Str. 37, D-09648 Mittweida

<sup>2</sup>Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

In Zusammenarbeit mit dem Laserinstitut Hochschule Mittweida und gefördert im InnoTeam Programm der Sächsischen Aufbaubank wurde der Einfluss der Pulsdauer und des Burstmodus auf die Effizienz und Oberflächenqualität bei der Gravur von Werkzeugmaterialien mittels ultrakurzer Laserpulse erforscht und optimale Bearbeitungsregimes gefunden. Die Kombination geeigneter Gravur- und Glättungsparameter sowie die Verwendung des Burstmodus im optimalen Fluenzbereich ermöglicht einen hochproduktiven Materialabtrag bei minimaler Anlagerung von Debris und minimaler Rauheit des Gravurbodens. Zudem wurden Untersuchungen zu den bei der Ultrakurzpulslaserbearbeitung emittierten Röntgenstrahlung durchgeführt. Daraus resultiert eine neue Verantwortung für die Betreiber von Laseranlagen mit Ultrakurzpulslaser und den Lasermaschinenbau.

*In cooperation with the University of Applied Sciences Mittweida and funded the InnoTeam fund of the Sächsische Aufbaubank, the influence of pulse duration and burst mode on efficiency and surface quality during engraving of tool materials with ultrashort laser pulses was researched and optimal processing regimes were found. The combination of suitable engraving and smoothing parameters as well as the use of the burst mode in the optimal fluence range enables highly productive material removal with minimal accumulation of debris and minimal roughness of the engraving ground. In addition, studies were conducted on the emitted X-ray radiation during ultrashort pulsed laser processing. This results in a new responsibility for operators of laser systems with ultrashort pulse lasers and for laser machine manufacturers.*

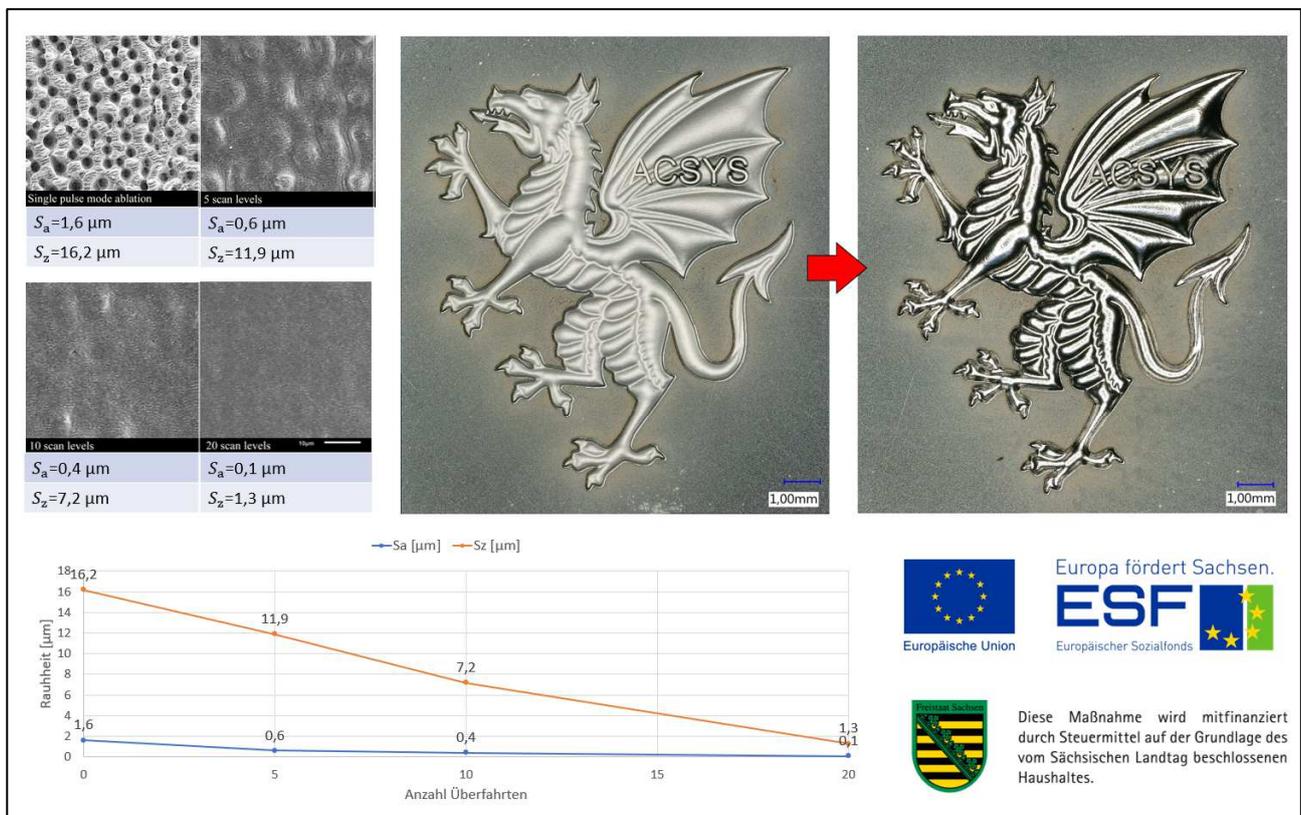


Abbildung 1: Glättung einer Lasergravierten Oberfläche mittels fs - Laserstrahlung im Burstmodus

# High-power nanosecond pulsed laser engraving with an ultra-high speed polygon mirror scanner

Florian Rößler<sup>1</sup>, Mathias Müller<sup>2</sup>, Robby Ebert<sup>1,2</sup>, André Streek<sup>1,2</sup>

1 MOEWE Optical Solutions GmbH, Schillerstr. 10, 09648 Mittweida

2 Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

*Increasing speed in laser processing is driven by the development of high-power lasers into ranges of more than 1 kW. Additionally, a proper distribution of these laser power is required to achieve high quality processing results. In the case of high pulse repetition rates, a proper distribution of the pulses can be obtained from ultra-fast beam deflection in the range of several 100 m/s. A two-dimensional polygon mirror scanner has been used to distribute a 1 kW nanosecond pulsed laser with a wavelength of 1064 nm for multi pass laser engraving. The pulse duration of this laser can be varied between 30 ns and 240 ns and the pulse repetition rate is set between 1 and 4 MHz. The depth information is included in greyscale bitmaps, which were used to modulate the laser during the scanning accordingly to the lateral position and the depth. The process allows high processing rates and thus high throughput.*

---



Abb. 1: Polygon mirror scanner for high power laser applications

# Laserstrahlglätten von Edelstahl mittels 10 kW Monomode Laser

Linda Pabst, Robby Ebert, André Streek

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Die Oberflächenrauheit beeinflusst wesentlich die Eigenschaften und Funktionalität von Werkstücken. Außerdem hat die Rauheit einen entscheidenden Einfluss auf die visuelle Erscheinung von Oberflächen. Deshalb wurde das Laserglätten von Edelstahl X5CrNi18/10 (1.4301) untersucht. Durch die Kombination eines 10 kW – Monomode Faserlasers mit einer ultraschnellen Strahlableitung mittels Polygonscanner können sehr hohe Geschwindigkeiten und damit sehr hohe Flächenraten umgesetzt werden. Damit konnten industrierelevante Prozesszeiten erreicht werden. Durch die Oberflächenbehandlung wurde die Ausgangsrauheit von  $S_a = 0,22 \mu\text{m}$  auf  $\sim 0,1 \mu\text{m}$  um  $\sim 55\%$  reduziert. Dabei konnte eine Flächenrate von bis zu  $0,855 \text{ m}^2/\text{min}$  erreicht werden.

Die Oberflächenbeschaffenheit hat einen entscheidenden Einfluss auf den visuellen Eindruck eines Produktes. Daher ist die Oberflächenbehandlungen ein finaler Bearbeitungsschritt in der industriellen Fertigung. Trotz aller technischen Entwicklungen wird in den meisten Fällen das Glätten noch manuell durchgeführt. Das mechanische / manuelle Polieren ist meist ein mehrstufiger Prozess und damit sehr zeitaufwendig. Die Bearbeitungszeiten liegen üblicherweise zwischen 10 und 30 min/cm<sup>2</sup> [1] Außerdem muss das manuelle Polieren von qualifizierten Facharbeitern durchgeführt werden, wodurch sehr hohe Produktionskosten entstehen. [2]

Es besteht daher die Notwendigkeit einer Automatisierung des Oberflächenglättings-Prozesses. In den letzten Jahren entwickelte sich das Laserglätten oder Laserpolieren zu einem alternativen Verfahren. Es basiert auf dem Aufschmelzen einer dünnen Schicht auf der Werkstückoberfläche. Durch die Oberflächen- und Grenzflächenspannung der Schmelze kommt es beim Erstarren zur Glättung der Oberfläche. Durch die Schmelzbaddynamik können somit sowohl feine Rauheiten als auch größere Unebenheiten ausgeglichen werden. Mithilfe des Laserglättings werden typischerweise Bearbeitungszeiten zwischen 3 und 180 s/cm<sup>2</sup> erreicht, abhängig von der Ausgangsrauheit, dem Bearbeitungsregime und der erzielten Endrauigkeit. [2]

In der Veröffentlichung wird ein Laserglättingsprozess mit einer sehr schnelle Strahlableitung mittels Polygonscanner in Kombination mit einer cw Hochleistungslaserquelle mit bis zu 10 kW Laserleistung vorgestellt. Durch die ultraschnelle Strahlableitung konnten die hohe Laserleistung im Glättingsprozess umgesetzt und damit industrierelevante Prozesszeiten erreicht werden. Für die Untersuchungen wurde der Edelstahl X5CrNi18/10 (1.4301) mit einer Oberflächengüte 2B verwendet. Die Ausgangsrauheit  $S_a$  von  $0,22 \mu\text{m}$  konnte in einem weiten Parameterbereich auf  $\sim 0,1 \mu\text{m}$  gebracht werden, siehe Abbildung 1 links. Das entspricht einer Reduzierung der Oberflächenrauheit um  $\sim 55\%$ . Die Bearbeitungszeit betrug dabei  $0,0033 - 0,066 \text{ s/cm}^2$ . Damit wurde die Bearbeitungszeit im Vergleich zum konventionellen Laserglätten um den Faktor 900 reduziert. Gleichzeitig konnte auch der Glanzwert der Oberfläche deutlich erhöht werden, dadurch wurde eine spiegelnde Oberfläche erreicht, siehe Abbildung 1 rechts. Durch das Aufschmelzen und anschließende Erstarren der Oberfläche wurde die Ausgangshärte von  $413 \pm 69 \text{ HV}$  auf durchschnittlich  $342 \pm 16 \text{ HV}$  gesenkt, unabhängig von den Bearbeitungsparametern.

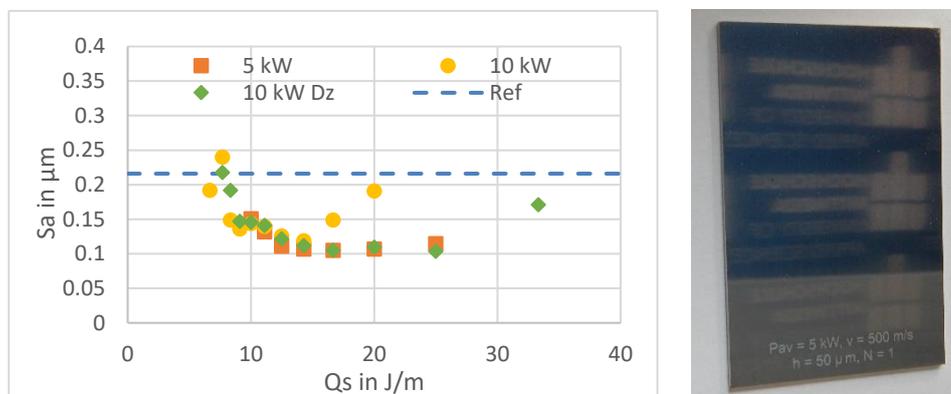


Abb. 1: links: erzielte Oberflächenrauheit  $S_a$  in Abhängigkeit der Streckenenergie  $Q_s$  für einen Linienabstand von  $25 \mu\text{m}$ ; rechts Makroskopische Aufnahme einer bearbeiteten Fläche

- [1] Laserpolieren von Vergütungsstahl mit Linienoptik; Weiß, C., Ketzer-Raichle, G., et al.; Jahrbuch Oberflächentechnik Band 71; 2015
- [2] Review on mechanism and process of surface polishing using lasers; Krishnan, A.; Fang, F.; Front. Mech. Eng.; 2019

# Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen – Neue Perspektiven für das Beschichten

Sabrina Vogt, Marco Göbel, Florian Hermann

TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen

Das Laserauftragschweißen (LMD) wird heutzutage als etabliertes Verfahren der Oberflächentechnik betrachtet. Das LMD ist eine häufig verwendete Technologie für hochwertige Reparaturen, Verschleiß- und Korrosionsschutz sowie Modifikationen an bestehenden Teilen. Eine neue Variante des bekannten LMD-Prozesses ist das Hochgeschwindigkeitslaserauftragschweißen (HS-LMD). Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Laserstrahl die Metallpartikel schon vor dem Auftreffen auf das Werkstück aufschmilzt und nicht erst auf dessen Oberfläche. Durch die Nutzung der einzigartigen Prozessmerkmale werden neue und in ihren Eigenschaften maßgeschneiderte Beschichtungssysteme möglich. Das HS-LMD kann in einem breiten Anwendungsspektrum eingesetzt werden: verschleißfeste Schichten auf Ventilen, Veredelung von Bremscheiben, korrosionsbeständige Beschichtungen für Wellen. In der Präsentation werden aktuelle Ergebnisse unter Verwendung neuer Systemtechnologien und Prozessparameter vorgestellt.



Abb. 1: Schematische Prozessansicht und Schichtaufbau sowie Wärmeinflusszone im Unterschied zwischen LMD (links) und HS-LMD (rechts).

# Laser-induced surface structuring for electron cloud mitigation in particle accelerators

Elena Bez<sup>1</sup>, Marcel Himmerlich<sup>1</sup>, Ana Karen Reascos Portilla<sup>1</sup>, Lucie Baudin<sup>1</sup>, Pierre Lorenz<sup>2</sup>, Klaus Zimmer<sup>2</sup>, Mauro Taborelli<sup>1</sup>, Andre Anders<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CERN, European Organization for Nuclear Research, 1211 Geneva 23, Switzerland

<sup>2</sup>Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V., Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany

*Pulsed laser processing of beam screen surfaces is a promising method for electron cloud mitigation in particle accelerators. By generating a hierarchically structured surface, the escape probability of secondary electrons is reduced. The choice of laser treatment parameters – such as laser power, scanning speed and line distance – has an influence on the resulting surface morphology as well as on its functionality. Their impact on the surface properties of copper is investigated in this study by Secondary Electron Yield (SEY) measurements, X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) and Scanning Electron Microscopy (SEM). For the final application, the capability to treat tens of meters of vacuum pipes is required. We will present the dedicated in-situ treatment setup and discuss SEY reduction as well as the limiting factors for surface treatment.*

## Application background

In particle accelerators, primary electrons are generated from proton beam induced residual gas ionization or photoemission due to synchrotron radiation. By interacting with the vacuum chamber walls, secondary electron multiplication can occur and lead to an electron cloud build-up that possibly induces a vacuum pressure rise, beam instabilities, heat loads to the cryogenic system of the beam pipe and surrounding superconducting magnets, and eventually a magnet quench. To avoid electron multiplication, the secondary electron yield (SEY) of the surface that is surrounding the beam shall ideally be close to 1 or below. The SEY is the ratio of number of electrons emitted from the surface per incident electron. Pulsed laser processing is one possibility to reduce the SEY of a surface by generating grooves decorated with nano-size features that can trap secondary electrons. However, the density of surface nanoparticles needs to be limited since they could be released from the surface in case of a magnet quench for instance, which would provoke a beam dump. The challenge for large-scale processing is to reach a sufficiently low SEY while limiting the ablation depth, keeping the scanning speed reasonably high and reducing the amount of loosely bound particles on the surface.

## Experimental screening of treatment parameters and surface properties

We have investigated the influence of the wavelength of pulsed laser irradiation (12ps, 100kHz) of Oxygen Free Electronic copper from UV (355 nm) via the visible (532 nm) to the IR range (1064 nm) to characterize relations between resulting surface topography, chemical composition and secondary electron emission. A typical Scanning Electron Micrograph is shown in Fig. 1. It reveals the creation of deep trenches caused by the focused laser pulses that induce material ablation and formation of an expanding plasma plume. A fraction of the released nano-

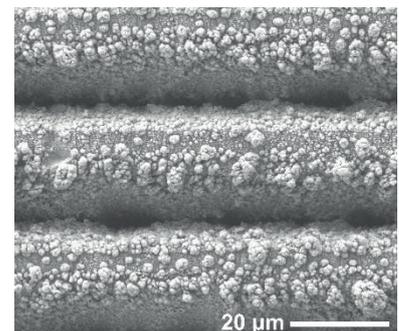


Fig. 1: Typical surface topography after ps-laser processing.

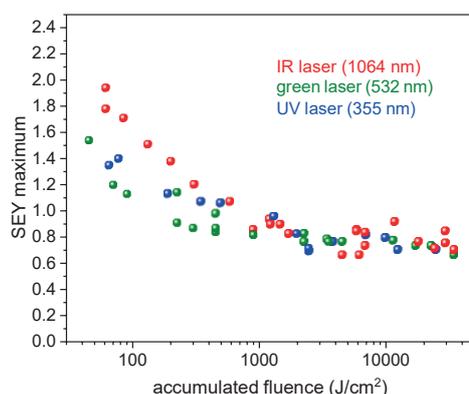


Fig. 2: Correlation between laser fluence and SEY maximum for different wavelengths.

particles is redeposited and covers the surface. The amount of detached particles is analysed by centrifugation and laser shock techniques that are based on applying non-contact, inertia forces on the surface. By varying the laser and scanning parameters during processing, the resulting surface topography alters accordingly. A clear correlation between laser fluence and ablation depth as well as the reduction of the SEY maximum was found that is independent on the laser wavelength (Fig. 2). This gained knowledge contributes to commission and optimize the final process of the in-situ setup, which is composed of a ps-pulsed laser, a beam delivery system combined with an optical fibre that guides the laser light towards an inchworm robot travelling in the vacuum pipe.

# Smart ultrafast laser processing with rotating beam – laser micro drilling, cutting and turning

Florian Lendner

GFH GmbH, Großwalding 5, 94469 Deggendorf

*GFH has developed a helical drilling optics, which rotates the beam up to 30.000 rpm in a very precise circle and allows furthermore to adjust the diameter and the incidence angle. This enables the laser to be used for high precision drilling and cutting and also for micro turning processes.*

*GFH hat eine Trepanieroptik entwickelt, die den Strahl in einer sehr präzisen Kreisbahn auf bis zu 30.000 U/min dreht und darüber hinaus den Durchmesser und den Einfallswinkel einstellen kann. Dadurch kann der Laser zum hochpräzisen Bohren und Schneiden sowie für Mikrodrehprozesse eingesetzt werden.*

---

Current micro drilling, cutting and turning processes are mainly based on EDM, milling, stamping, honing or grinding. All these technologies are using a tool with a predefined geometry that is transferred to the working piece.

In contrast the laser is a highly flexible tool, which can adapt its size very fast by changing only a software setting. Thanks to the efforts in laser development during the last years, stable ultrafast lasers with sufficient average power and high repetition rates became industrially available. For using as many pulses as possible, a cost-efficient production demands for innovative processes and machining setups with fast axes movement and special optics for beam manipulation.

GFH has developed a helical drilling optics, which rotates the beam up to 30.000 rpm in a very precise circle and allows furthermore to adjust the diameter and the incidence angle. This enables the laser to be used for high precision drilling and cutting and also for micro turning processes.

Gegenwärtige Mikrobohr-, Schneid- und Drehprozesse basieren hauptsächlich auf Erodieren, Fräsen, Stanzen, Honen oder Schleifen. Alle diese Technologien verwenden ein Werkzeug mit einer vordefinierten Geometrie, das auf das Werkstück übertragen wird.

Im Gegensatz dazu ist der Laser ein hochflexibles Werkzeug, das seine Größe sehr schnell anpassen kann, indem nur eine Softwareeinstellung geändert wird. Dank der Laserentwicklung in den letzten Jahren wurden stabile Ultrakurzpulslaser mit ausreichender Durchschnittsleistung und hohen Wiederholungsraten industriell verfügbar. Um möglichst viele Energie nutzen zu können, erfordert eine kostengünstige Produktion innovative Verfahren und Bearbeitungsmaschinen mit schneller Achsbewegung und spezieller Optik zur Strahlmanipulation.

GFH hat eine Trepanieroptik entwickelt, die den Strahl in einer sehr präzisen Kreisbahn auf bis zu 30.000 U/min dreht und darüber hinaus den Durchmesser und den Einfallswinkel einstellen kann. Dadurch kann der Laser zum hochpräzisen Bohren und Schneiden sowie für Mikrodrehprozesse eingesetzt werden.

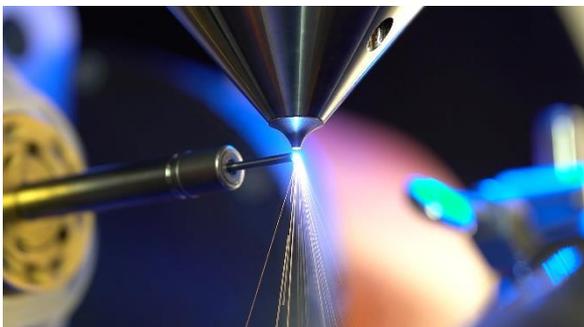


Abb. 1: Laser turning process by GFH GmbH.

# Optimierung der Bearbeitungsstrategie für scannerbasierte Materialbearbeitungsprozesse mit Ultrakurzpulslasern

A. Fehrenbacher<sup>1</sup>, M. Sailer<sup>1</sup>, C. Eberhardt<sup>1</sup>, S. Rübling<sup>2</sup>, A. Budnicki<sup>1</sup>, D. H. Sutter<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TRUMPF Laser GmbH, Aichhalder Straße 39, 78713 Schramberg

<sup>2</sup> TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen

Das Ziel dieser Arbeit ist es bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern und Galvo-Scansystemen sowohl die Prozesszeit zu minimieren als auch die Bearbeitungsqualität zu maximieren. Unter Betrachtung des Gesamtsystems aus Laser und Scanner wird unter Variation der zeitlichen und räumlichen Energieeinbringung die Bearbeitungsstrategie optimiert. Anhand von Simulationen werden Einflüsse auf die Prozesszeit wie Scangeschwindigkeit, Regelungsstrategie des Scannersystems, Position Synchronized Output (PSO) analysiert. Weiterhin wird durch reale Applikationsversuche die Bearbeitungsqualität bestimmt und komplexe Zusammenhänge dargestellt.

Bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern (UKPL) liegt der Fokus häufig auf dem Laser und den Bearbeitungsparametern, die durch den UKPL festgelegt werden wie Pulsenergie, Repetitionsrate, Pulsdauer etc. Es existieren darüber hinaus jedoch weitere Einflussgrößen der Systemtechnik, die einen bedeutenden Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis haben können: Parameter, die von Komponenten wie Strahlführung, Bearbeitungsoptik, Vorrichtung und deren Kombination stammen. Für die bestmögliche Erfüllung der Anforderungen sowie der Umsetzung einer hohen Prozesseffizienz und -Qualität ist es notwendig, sowohl den UKPL als auch die komplette Systemtechnik zu betrachten.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf dem Galvo-Scannersystem, insbesondere den damit verbundenen Einflussgrößen auf die Applikation. Das Ziel dabei ist die Reduzierung von Prozesszeiten bei einer gleichzeitig hohen Bearbeitungsqualität. Zur Erreichung des Ziels wird in Betracht der Interaktion zwischen Laser und Scannersystem die räumliche und zeitliche Energieeinbringung variiert.

Aus Simulationen werden zunächst Einflüsse auf die Prozesszeit wie Scangeschwindigkeit, Regelungsstrategie des Scannersystems, Implementierung von Position Synchronized Output (PSO) analysiert. Mithilfe der Ergebnisse kann mit gleicher Hardware die bestmögliche Ausnutzung des Lasers realisiert werden. Ein entscheidendes Resultat ist, dass die Scangeschwindigkeit einen dominanten Einfluss hat und durch die passende Wahl dieses Parameters nicht produktive Nebenzeiten reduziert werden können (siehe Abb. 1).

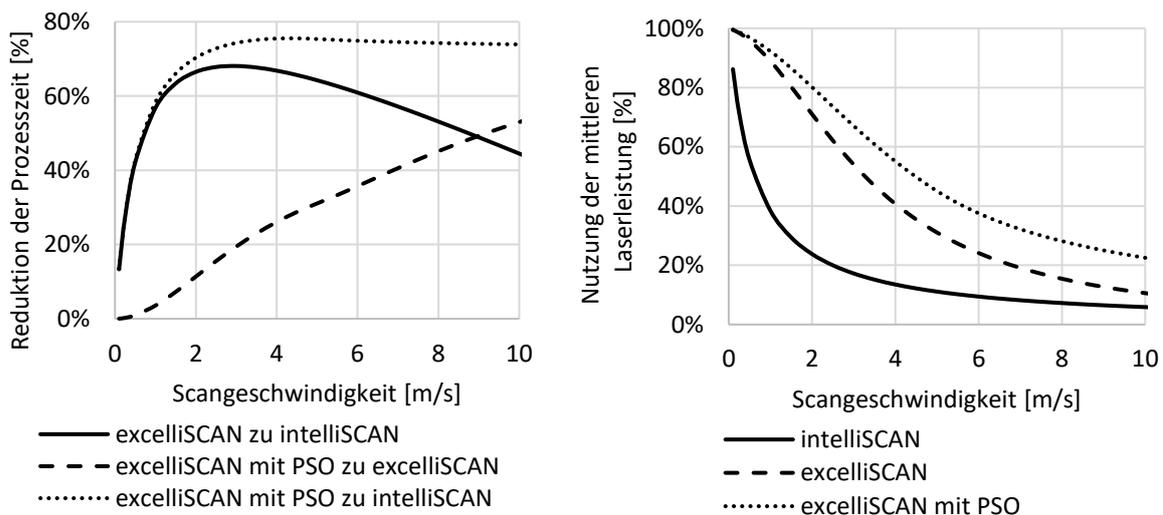


Abb. 1: Simulierte Prozesszeitreduktion und Nutzung der mittleren Laserleistung bei Gravur eines Quadrats mit Seitenlänge  $a = 500 \mu\text{m}$ , Linienabstand  $d_h = 6 \mu\text{m}$ , F-Theta Objektiv  $f = 160 \text{ mm}$ , excelliSCAN: Beschleunigung  $a = 50.000 \text{ m/s}^2$ , intelliSCAN mit Vector Tuning und pfo delay =  $400 \mu\text{s}$ .

Ergänzend zu den Berechnungen werden die Ergebnisse anhand einer realen Gravurapplikationen verifiziert und die erreichte Bearbeitungsqualität analysiert. Daraus werden Zusammenhänge aus Prozesseffizienz, Qualität, Prozesszeit, Ausnutzung mittlerer Leistung dargestellt und mithilfe des Gesamtbildes optimierte Bearbeitungsstrategien erarbeitet. Die Flexibilität des Bearbeitungssystems erlaubt eine schnelle softwarebasierte Parameterumschaltung, die es ermöglicht, durch mehrstufige Prozesse beste Qualität mit gleichzeitig hoher Produktivität umzusetzen.

# Entstehung unerwünschter Röntgenstrahlung bei der Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung

Jörg Schille<sup>1</sup>, Dany Kattan<sup>2</sup>, Sebastian Kraft<sup>1</sup>, Theo Pflug<sup>1</sup>,  
Alexander Horn<sup>1</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

<sup>2</sup> Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Universitätsstraße 1, 40225 Düsseldorf

Die unerwünschte Emission von Röntgenstrahlung zählt nach *Technischer Regel Optischer Strahlung „TROS Laserstrahlung“* zu den Gefährdungen durch indirekte Auswirkungen von Laserstrahlung und führt bei bestimmten Bestrahlungsbedingungen dazu, dass UKP-Laseranlagen als Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung unter das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) fallen. Aus Grundlagenuntersuchungen ist seit längerem bekannt, dass in Laserprozessen mit hochintensiven Laserpulsen gefährliche Röntgenstrahlung mit Photonenenergien  $> 5$  keV freigesetzt werden können. Infolge der Innovationen im Bereich der Ultrakurzpuls (UKP) - Lasertechnik und dem vermehrten Einsatz leistungsstarker UKP-Laserstrahlquellen in der Materialbearbeitung, beispielsweise zum Bohren, Strukturieren und dem Laserdrehen, oder auch im offenen Anlagenbetrieb zu Forschungszwecken ist auch hier der Schutz vor ungesunden Röntgenstrahlen von hoher Bedeutung.

Die durch Wechselwirkungen zwischen der einfallenden Laserstrahlung und dem angeregten Plasma erzeugten Röntgenstrahlen entstehen materialabhängig und werden von einer Vielzahl an charakterisierenden Bestrahlungskenngrößen aber auch durch die Prozessführung selbst beeinflusst. Folglich ist eine Vorhersage über die zu erwartende Röntgenemission nur sehr schwer zu treffen. Beispielhaft dafür werden in dieser Arbeit der Einfluss der Intensität sowie der Bestrahlungsstärke, Wellenlänge, Pulsdauer und Polarisation auf die freigegebene Ortsdosisleistung der Röntgenstrahlung vorgestellt und bestehende Abhängigkeiten diskutiert. Auch wird gezeigt, dass sich das Bearbeitungsregime (räumlicher und zeitlicher Pulsabstand, Pulsfolgefrequenz, Einfallswinkel, Scananzahl, Scanrichtung) signifikant auf die entstehende Ortsdosisleistung auswirken kann.

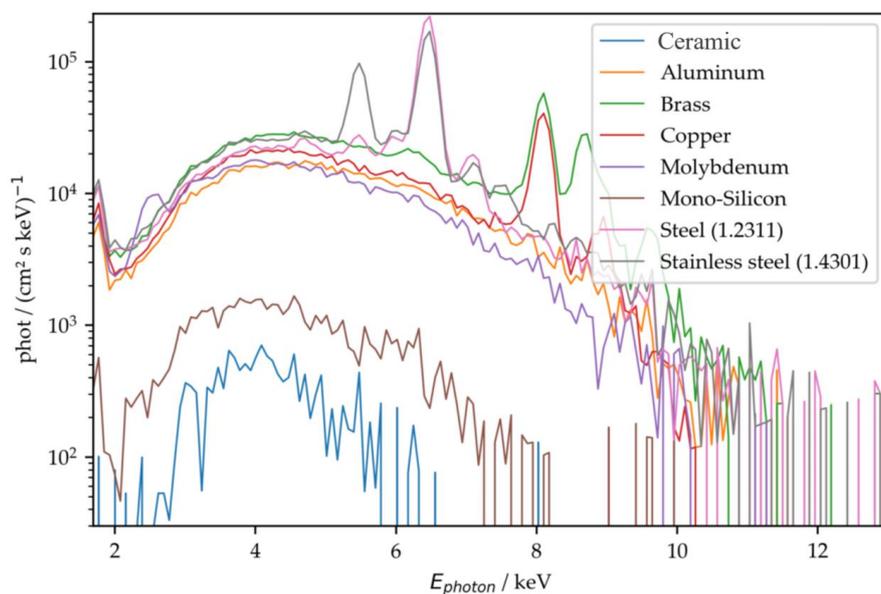


Abb. 1: Röntgenemissionsspektren aufgenommen bei der UKP-Laserbearbeitung verschiedener Materialien.

# Hochkontrast-Ultrakurzpulsmessungen für fortgeschrittene Industrieanwendungen und Laserentwicklung

Matthias Baudisch, Mateusz Ibek, Edlef Büttner, Peter Staudt

APE Angewandte Physik & Elektronik GmbH, Plauener Strasse 163-165 | Haus N, 13053 Berlin.

Femtosekunden-Ultrakurzpulslaser haben eine immer größere Bedeutung für eine Vielzahl von Materialbearbeitungsprozessen. Dabei adressieren auch immer mehr Untersuchungen die Abhängigkeit der Prozessqualität von der zeitlichen Laserpulsdauer [1-3], welche im Allgemeinen durch die Halbwertbreite des Pulses beschrieben wird. Über die Annahme einer Gauss- oder Sech<sup>2</sup>-förmigen Pulsform lässt sich dann die Spitzenleistung und Spitzenintensität eines Laserpulses bestimmen. Bei dieser Betrachtung wird jedoch meist vernachlässigt, dass Femtosekunden-Laserquellen auch Pulsenergien im Untergrund des Hauptpeaks im Picosekunden-Bereich haben können, welche mit herkömmlichen Pulsmessmethoden, wie z.B. kommerziellen, kollinearen SHG-Autokorrelatoren nur schwer zu identifizieren sind.

Hier zeigen wir unterschiedlichste Messungen mit dem neuen Hochkontrast-Autokorrelator der APE GmbH und demonstrieren deren Nutzen zum Identifizieren der tatsächlichen Pulsenergie im Femtosekunden-Hauptpeak.

Herkömmliche, kommerzielle Pulsmessmethoden wie kollineare SHG-Autokorrelation können meist nur schwer ermitteln, ob und wieviel Pulsenergie außerhalb des Femtosekunden-Hauptpulses in langgestreckten, pikosekunden-Strukturen vorhanden ist. Dieses Wissen gibt aber Aufschluss darüber, wie hoch die tatsächliche Spitzenleistung und Spitzenintensität der Lichtquelle wirklich ist und wieviel Pulsenergie nur bedingt zum Bearbeitungsprozess beiträgt.

Der Typ2-Hochkontrast-Autokorrelator der APE GmbH ermöglicht es SHG-Autokorrelationen mit Signal-zu-Rauschverhältnissen von bis zu  $10^7$  über einen Scanbereich von 1000 ps aufzunehmen. Im Unterschied zu herkömmlichen Typ1-SHG-Autokorrelatoren basiert der Hochkontrast-Autokorrelator auf der nichtlinearen Typ2-Interaktion, welche eine fast untergrundfreie Autokorrelationsmessung selbst in kollinear Strahlgeometrie ermöglicht (siehe [4] für weitere Details). In Bild 1 ist ein Beispiel einer Hochkontrast-Autokorrelation eines Femtosekunden-Lasers mit einer FWHM-Pulslänge von 300 fs zu sehen (blaue Linie) und in Gelb ist die Gauss-Fit-Kurve dargestellt. Im Vergleich erreichen Standard-Autokorrelatoren typischerweise ein Signal-zu-Rauschverhältnis von  $10^2$  bis  $10^3$ , mit welchem der Pikosekunden-Untergrund nicht sichtbar wäre.

Neben der Charakterisation von bestehenden Quellen, sind Hochkontrast-Autokorrelationen ein perfektes Werkzeug zur Optimierung des Pulscontrastes von Laserquellen (Beispiel: Kompressor-Einstellungen und -Eigenschaften) und daraus resultierender Prozessoptimierung bei der Werkstoffbearbeitung.

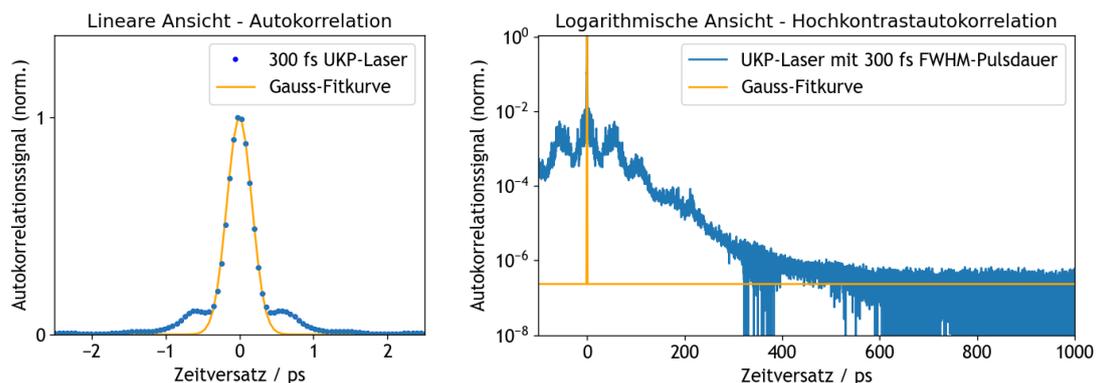


Bild1: Beispielmessung eines Femtosekunden-Ultrakurzpulslasers mit dem Hochkontrast-Autokorrelator. Neben dem Femtosekunden-Hauptpeak ist eine zeitlich deutlich längere Untergrundstruktur zu erkennen, welche mit Standard-SHG-Autokorrelatoren nicht sichtbar ist. Bei dem Beispiel befinden sich nur ca. 52 % des Flächenintegrals im gelben Fit des Femtosekunden-Hauptpeaks.

[1] R. Le Harzic et al., "Pulse width and energy influence on laser micromachining of metals in a range of 100fs to 5ps," Applied Surface Science 249, Issues 1–4, (2005).  
[2] C. Chien und M. Gupta, "Pulse width effect in ultrafast laser processing of materials," Appl. Phys. A 81, 1257 (2005).  
[3] T. C. Gunaratne et al., "Influence of the temporal shape of femtosecond pulses on silicon micromachining" , Journal of Applied Physics 106, 123101 (2009).  
[4] M. Ibek und T. Neicke, "Advanced Ultrashort-Pulse Laser Diagnostics," PhotonicsViews, 16: 56-58 (2019).

# Untersuchungen zur fluenzabhängigen transienten Reflektivität von Edelstahl nach Anregung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

Theo Pflug<sup>1</sup>, Markus Olbrich<sup>1</sup>, Jan Winter<sup>2</sup>, Jörg Schille<sup>1</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>, Heinz Huber<sup>2</sup>,  
und Alexander Horn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

<sup>2</sup> University of Applied Sciences Munich, Lothstraße 34, 80335 München

*Die Ablationseffizienz bei der Lasermaterialbearbeitung hängt stark vom Reflexionsgrad des zu bearbeitenden Materials ab. Bei der Bestrahlung mit hochintensiver ultrakurz gepulster Laserstrahlung im Femtosekundenbereich kann sich der Reflexionsgrad bereits drastisch ändern während der Puls noch wirkt. Somit wird in Abhängigkeit der Fluenz der anregenden Laserstrahlung die Pulsenergie unterschiedlich effizient in das Material eingekoppelt. Diese Arbeit untersucht die transienten Reflektivität von Edelstahl während der Anregung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung (800 nm, 40 fs) mittels orts- und zeitaufgelöster Pump-Probe-Reflektometrie. Die beobachtete transiente Reflektivität sinkt dabei monoton bis zu einer Fluenz von 1 J/cm<sup>2</sup> und steigt für höhere Fluenzen wieder. Daraus ergibt sich bei Anregung mit einer gaußförmigen räumlichen Intensitätsverteilung eine ringförmige Änderung der Reflektivität.*

Die wachsenden Anforderungen an die Qualität und Effizienz bei der Lasermaterialbearbeitung erfordern ein zunehmend größeres Verständnis der stattfindenden physikalischen Prozesse. Bei der Bestrahlung mit Laserstrahlung im Femtosekundenbereich wechselwirkt das elektrische Feld hauptsächlich mit dem Elektronensystem. Da das Elektronensystem nicht vollständig frei schwingen kann, wird ein Teil der Pulsenergie gemäß der Drudetheorie absorbiert und die Elektronentemperatur steigt. Erst nach einigen Pikosekunden relaxieren Elektronen- und Phononensystem durch Stoßprozesse. Durch das Aufheizen des Elektronensystems während der Bestrahlung ändern sich auch die optischen Eigenschaften wie Reflexions- und Absorptionsgrad des Materials bereits während der Bestrahlung [1,2].

Diese Studie untersucht die transiente Reflektivität von Edelstahl während und nach der Bestrahlung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung (800 nm, 40 fs) mittels orts- und zeitaufgelöster Pump-Probe-Reflektometrie bei einer Wellenlänge der Probelaserstrahlung von 532 nm. Die Ortsauflösung des abbildenden Setups erlaubt in Kombination mit dem gaußförmigen Strahlprofil der anregenden Strahlung eine direkte Messung der fluenzabhängigen Transienten Reflektivität. Die transiente Reflektivität sinkt dabei für Fluenzen  $H_0 < 1 \text{ J/cm}^2$  und steigt wieder für größere Fluenzen (Abb. 1). Diese Beobachtung könnte eine Erklärung für die sinkende Ablationseffizienz bei hohen Fluenzen sein [3].

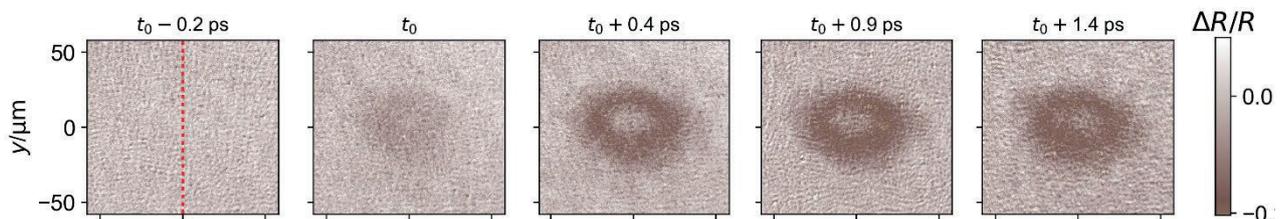


Abb. 1: ortsauflöste relative Änderung der Reflektivität  $\Delta R/R$  von Edelstahl nach der Bestrahlung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung (800 nm, 40 fs) mit einer Spitzenfluenz von 2 J/cm<sup>2</sup> gemessen mit Pump-Probe-Reflektometrie.

- [1] T. Pflug, J. Wang, M. Olbrich, M. Frank, A. Horn, Appl Phys A **124** (2018), 17572
- [2] M. Olbrich, T. Pflug, C. Wüstefeld, M. Motylenko, S. Sandfeld, D. Rafaja, A. Horn, Opt Lasers Eng **129** (2020), 106067
- [3] D. Metzner, M. Olbrich, P. Lickschat, A. Horn, S. Weißmantel, Lasers Manuf Mater Process **80** (2020), 3886

# Erzeugung von laserinduzierten Schockwellensignalen für die Vermessung von Asphaltkörpern

Manuel Pfeiffer, Jörn Hübelt, Steffen Weißmantel  
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

*Ziel dieser Untersuchungen war die Erforschung und Entwicklung einer neuartigen opto-akustischen Messtechnologie für eine mobile, berührungslose, zerstörungsfreie Bestimmungsmethode des strukturellen Zustands von Asphaltfahrbahnen, speziell der dafür notwendigen laserinduzierten Signalerzeugung. Diese Messtechnologie basiert auf der Impulseinkopplung hochenergetischer Laserpulse, die in die Fahrbahnoberfläche eingetragen werden und aus der Auswertung der Ausbreitungs- und Reflexionsmustern der so generierten Körperschallwellen. Hierfür wurden Versuche zur Bestimmung der generellen Einflussparameter hinsichtlich der laserinduzierten Signalgenerierung vorgenommen. Ziel war dadurch die Generierung von Schockwellensignalen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 20 kHz mit ausreichender Signalstärke & -reichweite für die Anwendung einer MASW-Vermessungsmethode (MASW – „Multichannel Analysis of Surface Waves“), welche für die anschließende Signalzuordnung in einem horizontal geschichteten Medium (Asphaltfahrbahn), notwendig ist.*

## Anlagentechnik

Die Grundlage des experimentellen Aufbaus für die Laboruntersuchung an den Asphaltprobekörpern (Deckschichtmaterial AC 8 DS) zur Schockwellenanregung mittels hochenergetischer Laserpulse bildet eine Excimerlaser-Anlage mit einem integrierten KrF-Excimerlaser LPX Pro 305F der Firma Coherent GmbH mit einer Wellenlänge von 248 nm, einer Pulsdauer von 30 ns und einer Pulsenergie auf der Probenoberfläche von bis zu 400 mJ. Die Pulsrepetitionsrate kann im Bereich von 1 - 50 Hz variiert werden. Die Fleckgröße der fokussierten Laserstrahlung auf der Probe beträgt 0,488 mm<sup>2</sup>.

## Grundlagen zur laserinduzierten Schockwellenanregung

Die laserinduzierte Schockwellenanregung basiert auf der Absorption hochenergetischer Laserpulse in der Probekörperoberfläche. Bei ausreichend kurzen Pulsdauern im Nanosekundenbereich und gleichzeitig hohen Laserstrahlintensitäten  $> 10^8 \text{ W/cm}^2$  erfolgt, durch den Materialabtrag einiger zehn bis hundert Atomlagen vom Probekörper, eine explosionsartige Plasmabildung. Durch die Plasmaexpansion wird ein gegenwirkendes Krafteintrag hervorgerufen, in dessen Folge eine resultierende Schockwellenfront im Probekörper entsteht und sich in Form eines Körperschallfeldes u. a. durch Rayleighwellen ausbreitet. Das so generierte Schockwellenprofil folgt dabei grob den zeitlichen Eigenschaften der verwendeten Laserstrahlung, wobei der Schockwellendruck von der Laserstrahlwellenlänge, der Pulsdauer, der Fokus-Spot-Größe, sowie vom Probekörpermaterial selbst als auch von der Plasmaexpansion abhängt.

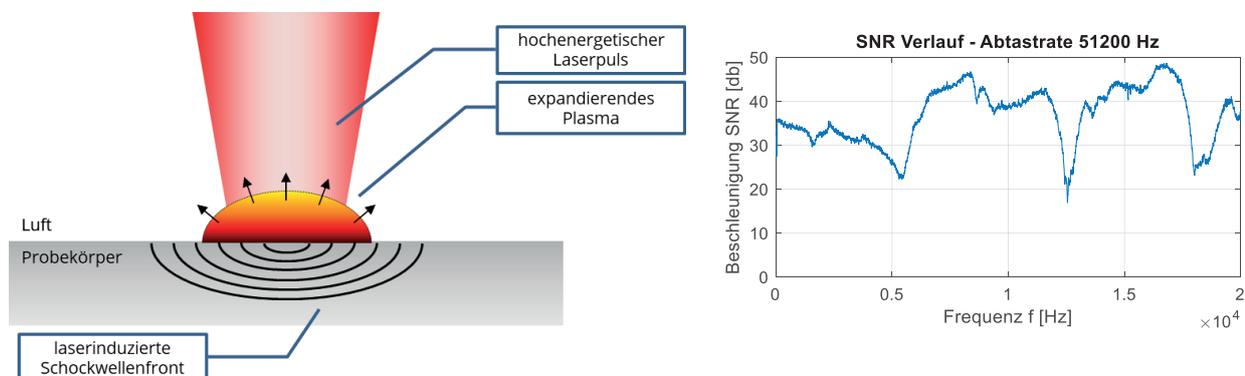


Abb. 1: Schematische Darstellung für die Erzeugung einer laserinduzierten Schockwelle (links). Frequenzabhängiger Beschleunigungssignalverlauf (SNR - Signal-Rausch-Verhältnis) einer gemessenen laserinduzierten Schockwelle in einem Asphaltprobekörper (rechts).

## Relevanz des Fokusshift für die Produktion

Reinhard Kramer, Thomas Umschlag, Ruben Hartwig, Stephan Holesch  
PRIMES GmbH, Max-Planck-Straße 2, 64319 Pfungstadt

*Exzellentes Prozessverständnis und ständige Prozesskontrolle sind der Schlüssel zum Erfolg in der Lasermaterialbearbeitung. Ein neues Konzept für das Offline- und Online-Fokustracking der PRIMES GmbH soll ständige Prozessüberwachung ermöglichen. Verbesserte Prozesskontrolle führt zu weniger Ausschuss, steigender Verfügbarkeit, macht Service planbar und reduziert unter dem Strich die Gesamtkosten der Produktion.*

*Excellent process understanding and steady process control are the keys to success in laser material processing. PRIMES GmbH designed a new concept for offline and online focus tracking to enable constant process monitoring. Improved process control leads to less scrap parts, increased uptime, enables preventive maintenance and reduces the overall costs of production.*

Basis für die Herstellung gleichbleibend hochwertiger Produkte ist ein exzellentes Prozessverständnis und ständige Prozesskontrolle. Ein wichtiger Bestandteil für die laserbasierte Fertigung sind etablierte, robuste Prozessparameter, durch die Unternehmen höchste Produktqualität bei angemessenem Produktionsdurchsatz erzielen. Der Schlüssel zum Erfolg aber ist das Wissen um den Einfluss der wesentlichen Prozessschwankungen, Systemkenngrößen sowie Bauteiltoleranzen. Daraus resultiert eine Sicherheitsreserve für den Prozess, die sich positiv auf Produktivität und Prozesslaufzeit auswirkt. Eine Verbesserung der Prozessstabilität bzw. der Prozesskontrolle führt zu weniger Ausschuss, steigender Verfügbarkeit und reduziert unter dem Strich die Gesamtkosten für jedes einzelne Bauteil.

Die im Laserprozess auftretende Variation der Fokusposition in Bezug auf das Werkstück, kurz Fokusshift, ist als zentraler Parameter und häufige Ursache für Qualitätsprobleme in der Produktion bekannt. Standzeiten der Produktionsanlage sind der aus dem Fokusshift resultierende Kostentreiber. Für jede Fertigungsanlage gibt es typischerweise einen festgelegten Grenzwert, einer noch tolerierbaren Fokusposition. Ohne Kenntnis der absoluten Fokusposition ist eine Korrektur während der Bearbeitung nicht möglich. Verlässt der Prozess die vorgegebenen Grenzwerte ist eine Produktionsunterbrechung zum Tausch der optischen Komponenten in der Regel die einzige Option. Übertragen auf eine "reale Produktionsumgebung" muss der Fokusshift während der gesamten Produktionsdauer möglichst gering sein, um höchste Teilequalität zu gewährleisten. Eine Verschmutzung der Optik und damit einhergehend, stetiger oder spontan erhöhter Fokusshift kann, auch in stabilen Prozessen, nie ausgeschlossen werden.

Mit diesem Beitrag soll die Relevanz der Fokusverschiebung in der Produktion, bezogen auf die Leistungsdichte und die Spotgröße auf dem Werkstück sowie das Prozessergebnis anhand von Beispielen, diskutiert werden. Wir möchten Möglichkeiten für die Echtzeitmessung sowohl offline als auch online während der Produktion, im Bereich 10 Hz

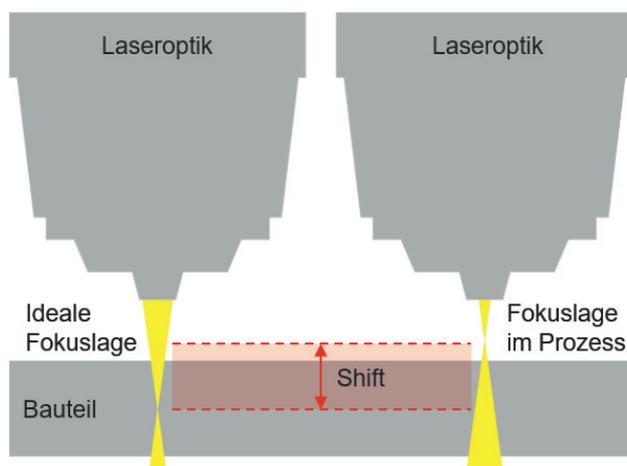


Abb. 1: Anwendung FocusTracker

bis 50 Hz Abtastrate, präsentieren. Unser Ziel ist es, durch die Messung der Fokusverschiebung und die Interpretation der Daten, eine besser kontrollierbare und stabilere Produktionsumgebung zu schaffen. Daten der Offline-Fokusshiftmessung können für die Prozessplanung und -optimierung verwendet werden, indem man Rahmenbedingungen für den Prozess robust gegenüber dem Fokusshift gestaltet. Die Online-Überwachung des Fokusshift hilft Qualitätsprobleme direkt in der Bearbeitung der Teile zu identifizieren. Kennzeichnen betroffener Teile und die sofortige Reparatur betroffener Komponenten der Strahlführung hilft, Ausschuss und Standzeiten zu minimieren. Monitoring für den Fokusshift während der gesamten Produktionsdauer ermöglicht das Planen vorbeugender Wartung.

Die PRIMES GmbH hat ein neues Konzept für das Offline- und Online-Fokustracking entwickelt. Das Messprinzip lässt sich in einen Bearbeitungskopf integrieren und kann genauso als externes Messgerät verwendet werden. Alle in diesem Beitrag beschriebenen Messungen wurden mit dem FocusTracker durchgeführt, um den erfolgreichen Einsatz in der Praxis nachzuweisen.

# 3D-Druck in Metall am Laserinstitut Hochschule Mittweida – Von Mikro bis Großformat

André Streek

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Die Entwicklung der additiven Fertigung schreitet in großen Schritten in Richtung Zukunft voran. Bereits jetzt, in unserer unmittelbaren Gegenwart, zeichnet sich ab, dass hier eine nicht mehr wegzudenkende Fertigungstechnologie der Zukunft entsteht. Unter dem Label „3D-Druck“ vereinen sich viele der unterschiedlichsten additiven Fertigungsverfahren und -technologien zu einem bereits im alltäglichen Gebrauch angekommenen Synonym. Mittlerweile reihen sich auch die laser-pulverbettbasierten Verfahren unter diesem Label ein. Im Bereich der Prozess- und Verfahrensentwicklung des metallischen 3D-Drucks lassen sich in den letzten Jahren neue Strömungen ausmachen. So ist zum einen, die additive Fertigung von Metallbauteilen im  $\mu\text{m}$ -Maßstab für zukünftige Anwendung der minimalinvasiven Operationstechnik sowie für die Luft- und Raumfahrt von hohem Interesse. Auf der anderen Seite werden gegenwärtig Technologien zur Fertigung sehr großer und schwerer Bauteile entwickelt. Die Laserforschung in Mittweida beschäftigt sich neben den Weiterentwicklungen des konventionellen 3D-Drucks von Metall auch mit diesen neuen Bestrebungen. So ist das Verfahren des Lasermikrosinterns seit Jahren Gegenstand der Forschung am Standort. Hinzu kommen neuartige Ansätze zum großvolumigen Schwerlastdruck, der neue Anwendungsbereiche für additiv gefertigte metallische Bauteile erschließen kann, die bislang dem Bereich der Gießereitechnik vorbehalten waren.

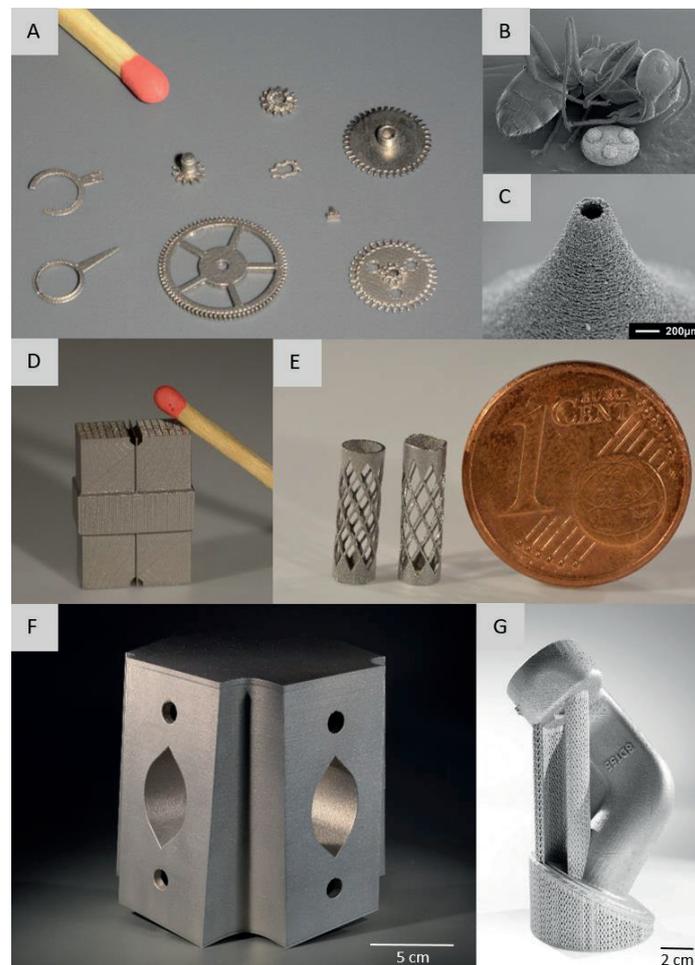


Abbildung 1: Verschiedene Demonstratoren:

- A Uhrwerk-Einzelteile aus Edelstahl (316L), Mikro-SLM-Verfahren
- B Innenohrimplantat aus Tantal, Lasermikrosinter-Verfahren
- C Öffnung einer Mikrodüse aus Edelstahl (1.4404), Lasermikrosinter-Verfahren
- D Mikrowärmeübertrager aus Edelstahl (316L), Lasermikrosinter-Verfahren
- E Spiraldrahtprothese (Stent) aus Edelstahl (17-4 PH), Mikro-SLM-Verfahren
- F Verbindungselement aus AlSi10Mg, SLM-Verfahren
- G Verbindungselement aus AlSi10Mg, SLM-Verfahren

# Mantelmode-Superkontinuumserzeugung

Tobias Baselt, Christopher Taudt, Peter Hartmann

Fraunhofer IWS, Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, DE-01277 Dresden, Germany

Westfälische Hochschule Zwickau, Fakultät Physikalische Technik/Informatik, Kornmarkt 1, DE-08056 Zwickau, Germany

Die Erzeugung eines Superkontinuums im Mantel einer photonischen Kristallfaser ermöglicht die Skalierung der Kernfläche, ohne die Führungseigenschaften der optischen Faser wesentlich zu beeinträchtigen. Bei der Konversion der Strahlung eines Anregungslasers im Mantel einer mikrostrukturierten Faser konnte gezeigt werden, dass breitbandige Superkontinua generiert werden können. Eine konische Faserpräparation unter Verwendung einer Faserendoptik gestattet die effiziente Kopplung der Laserstrahlung in den mikrostrukturierten Fasermantel. Dies ermöglicht gegenüber einer kerngepumpten Konfiguration zur Superkontinuumsgeneration die in den Wellenleiter gekoppelte Anregungslaserleistung um  $4,9 \text{ dB} \pm 0,2 \text{ dB}$  zu erhöhen ohne die Endfläche des Wellenleiters zu zerstören. Die effiziente Umwandlung in den sichtbaren Spektralbereich ist unter anderem auf eine große Anzahl der beteiligten Mantel-Moden zurückzuführen, da diese eine Phasenanpassung verschiedener spektraler Kombinationen ermöglichen, was eine effiziente Strahlungskonversion durch Vierwellenmischung ermöglicht.

Die selektive Kopplung des Pumplichts in den zentralen Kern der untersuchten mikrostrukturierten Faser bzw. in den Mantel dieser Faser wurde evaluiert. In diesem Fall konnte gezeigt werden, dass ein Superkontinuum in den Mantelmoden erzeugt werden kann und nicht durch Streuung von der im Kern geführten Mode im Mantel entsteht. Die daraus resultierende räumliche Intensitätsverteilung des generierten Superkontinuums im sichtbaren Spektralbereich ist in Abb. 1 (a) dargestellt. Die spektral integrierte räumliche Intensitätsverteilung im Nahfeld zeigt, dass der größte Teil der in den sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich konvertierten Strahlung im zentralen Kern verbleibt. Die rot gestrichelte Kurve in Abb. 1 zeigt die spektrale Leistungsdichte bei der kerngepumpten Superkontinuumserzeugung (Pumpleistung knapp unterhalb der Zerstörungsschwelle). Die in das Diagramm eingefügten Abbildungen zeigen das ausgekoppelte Licht im sichtbaren Spektralbereich bei vergleichbarer Einkopplung des Pump lasers in den Kern (a) und den Mantel der mikrostrukturierten Faser (b). Die maximale Leistung, die in den Mantel gekoppelt werden kann, ist deutlich größer und es konnten mittlere Pumplaserleistungen von bis zu 22,5 W gekoppelt werden. Die erzielte integrale, mittlere Leistung im sichtbaren Spektralbereich kann bei einer mittleren Pumpleistung von 7,5 W von 0,07 W im kerngepumpten Superkontinuum auf 0,48 W im fasermantelgepumpten Superkontinuum gesteigert werden.

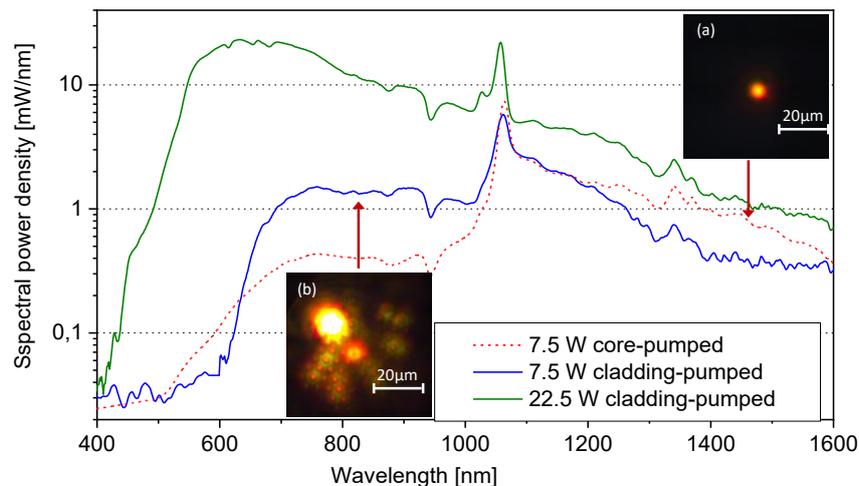


Abb. 1 Spektrale Leistungsdichte der im Kern (rot gepunktete Kurve) und Mantel (blaue Kurve) generierten Superkontinua, wobei eine Faserlänge von 5 m eingesetzt wurde und eine mittlere Pumpleistung von 7,5 W erreicht wird. Die höchste erreichte spektrale Leistungsdichte in den Mantelmoden wird mit einer gekoppelten mittleren Leistung von 22,5 W erzielt (grüne Kurve). Die eingefügten Nahfeld-Intensitätsprofile zeigen das im Kern und Mantel geführte Superkontinuum.

# Laserinduzierte Kristallisation dünner Co-Fe-B-Schichten

Sandra Busse<sup>1</sup>, Apoorva Sharma<sup>2</sup>, Maria Almeida-Hoffmann<sup>3</sup>, Patrick Matthes<sup>4</sup>, Nicole Köhler<sup>3</sup>, Mathias Müller<sup>1</sup>, Stefan E. Schulz<sup>3,4</sup>, Dietrich R. T. Zahn<sup>2</sup>, Georgeta Salvan<sup>2</sup> und Alexander Horn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Deutschland

<sup>2</sup>Physikinstitut, TU Chemnitz, Straße der Nationen 62, 09126 Chemnitz, Deutschland

<sup>3</sup>Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM), TU Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland

<sup>4</sup>Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS), Technologie-Campus 3, 09126 Chemnitz, Deutschland

Durch Anwendung von Röntgenbeugung (XRD) unter Verwendung von Synchrotronstrahlung konnte der erste direkte Nachweis lokaler Kristallisation dünner Co-Fe-B-Schichten (10 nm), hervorgerufen durch Laserbestrahlung ( $\lambda = 1064$  nm), erbracht werden. Untersucht wurde die Abhängigkeit der Kristallisation von verschiedenen Bestrahlungsparametern, wie Scangeschwindigkeit und Intensität (cw). Zudem wurde ein Vergleich mit dem herkömmlichen Verfahren des Heizens im Vakuumofen durchgeführt, wobei hier Heiztemperatur und -dauer variiert wurden. Eine systematische Untersuchung dünner Co-Fe-B-Schichten mit unterschiedlicher Stöchiometrie und zusätzlichen verschiedenen benachbarten Schichten aus Ru, Ta und MgO mit Hilfe von XRD und SQUID-Magnetometrie ermöglichte die detaillierte Aufklärung der Kristallisationszusammenhänge [1].

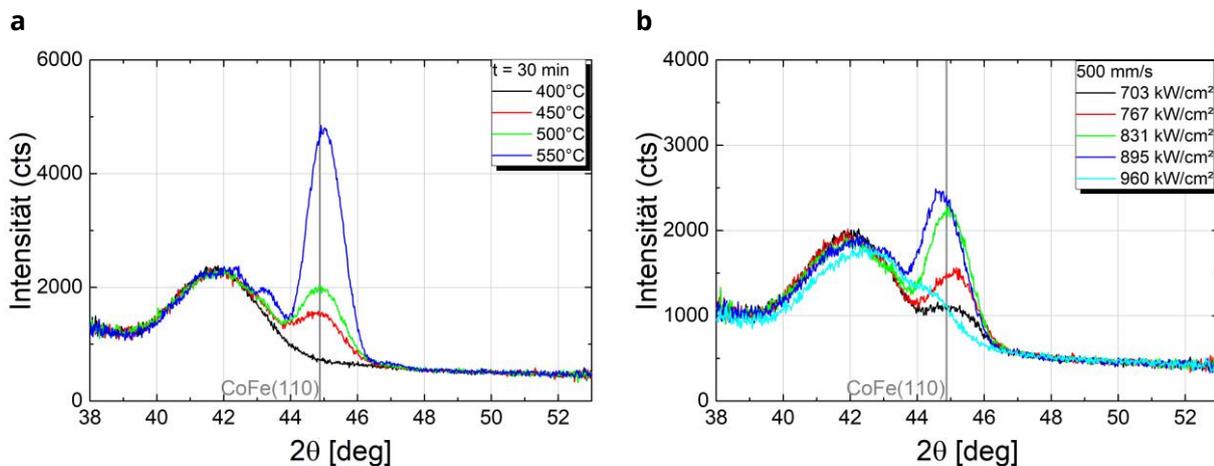


Abb. 1: XRD  $\theta$ - $2\theta$ -Scans von Ta(5 nm)/Ru(3 nm)/Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub>(10 nm)/Ta(5 nm)-Schichtstapeln auf Si-Substrat (a) geheizt im Ofen für 30 min bei Temperaturen von 400°C bis 550°C und (b) geheizt durch kontinuierliche Laserstrahlung verschiedener Intensitäten bei einer Scangeschwindigkeit von 500 mm/s

## Referenzen

[1] M. Almeida Hoffmann, A. Sharma, P. Matthes, N. Köhler, S. Busse, M. Müller, O. Hellwig, A. Horn, G. Salvan, S. E. Schulz, „Laser induced crystallization of Co-Fe-B films“, Scientific Reports (2021), accepted

# Anwendung des metallischen Mikro-3D-Drucks für die Demonstratorherstellung

Julian Drechsel, Martin Erler, Robby Ebert und Horst Exner  
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, D-09648 Mittweida

Das am LHM etablierte Verfahren des Mikro-SLM ist eine Weiterentwicklung des bereits seit mehreren Jahren in der Industrie etablierten „makroskopischen“ Selektiven Laserschmelzen (SLM). Unter Verwendung von idealen Parametern wurden unter Zuhilfenahme der VDI3405 Bauteile aus Edelstahl 316L unterschiedlicher Art und Struktur angefertigt. Die Besonderheiten des Verfahrens sind der geringe Fokussdurchmesser von  $<30\ \mu\text{m}$  und die geringe Pulverkorngröße von  $<10\ \mu\text{m}$ . Mithilfe solcher Fokussdurchmesser können Bauteile mit extrem kleinen Strukturauflösungen realisiert werden. So konnten verschiedene Teststrukturen und Demonstratoren im Mikrobereich erzeugt werden. Während die Teststrukturen zur Qualitätsbestimmung wie Zugfestigkeit und Dichte herangezogen wurden stellen die Demonstratoren einen Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens dar. Die vorgestellten Bauteile des metallischen 3D-Drucks reichen von Strukturbauteilen über Uhrwerksteile bis hin zu Gitterstrukturen für die Medizintechnik.

Die Untersuchungen fanden im Rahmen der Nachwuchsforschergruppe EilaSax (gefördert durch den Europäischen Sozialfond „ESF“) statt.

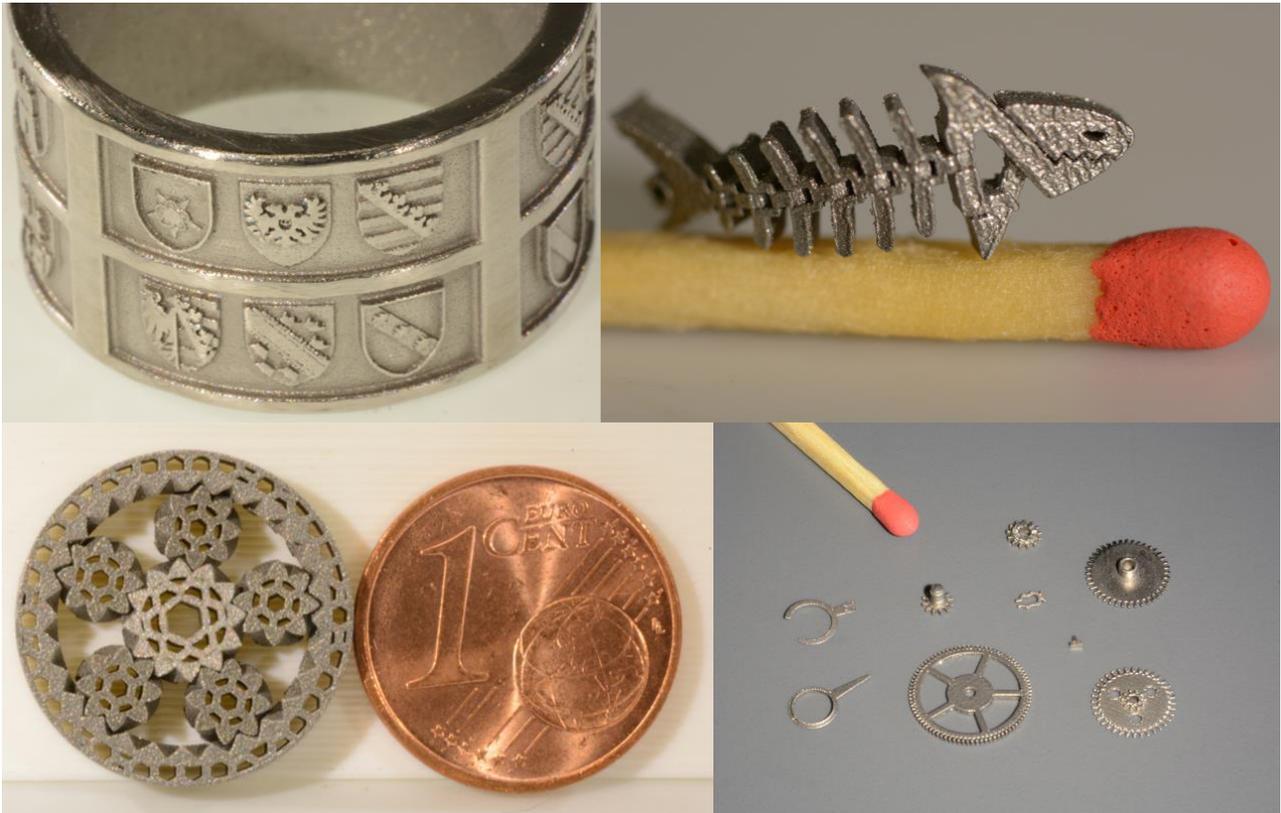


Abb. 1: Darstellung verschiedener Demonstratoren aus Edelstahl 316L von links oben nach rechts unten: Wappen auf Ringstruktur, flexibler Fisch auf Streichholz, Planetengetriebe mit Cent Münze, Auswahl an Uhrwerksteilen mit Streichholz

# FRET-assisted structural model of a ribosomal tertiary contact

Felix Erichson<sup>1</sup>, Fabio D. Steffen<sup>2</sup>, Richard Börner<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Germany

<sup>2</sup>Department of Chemistry, University of Zurich, Winterthurerstraße 190, 8057 Zurich, Switzerland

Long-range tertiary interactions between RNA tetraloops and their receptors stabilize the folding of ribosomal RNA and support the maturation of the ribosome [1]. Here, we use FRET-assisted structure prediction to develop a structural model of the KL-TL<sub>GAAA</sub> interaction and its dynamics [2]. We build the docked KL-TL<sub>GAAA</sub> and a structure ensemble of the undocked KL-TL<sub>GAAA</sub> de novo, label the RNA in silico and compute FRET histograms based on MD simulations [3, 4]. The predicted mean FRET efficiency is remarkably consistent with single-molecule experiments of the docked KL-TL<sub>GAAA</sub> and the undocked structure ensemble. This hybrid approach of experiment and simulation will promote the elucidation of dynamic RNA tertiary contacts and accelerate the discovery of novel RNA and RNA-protein interactions as potential drug targets [5].

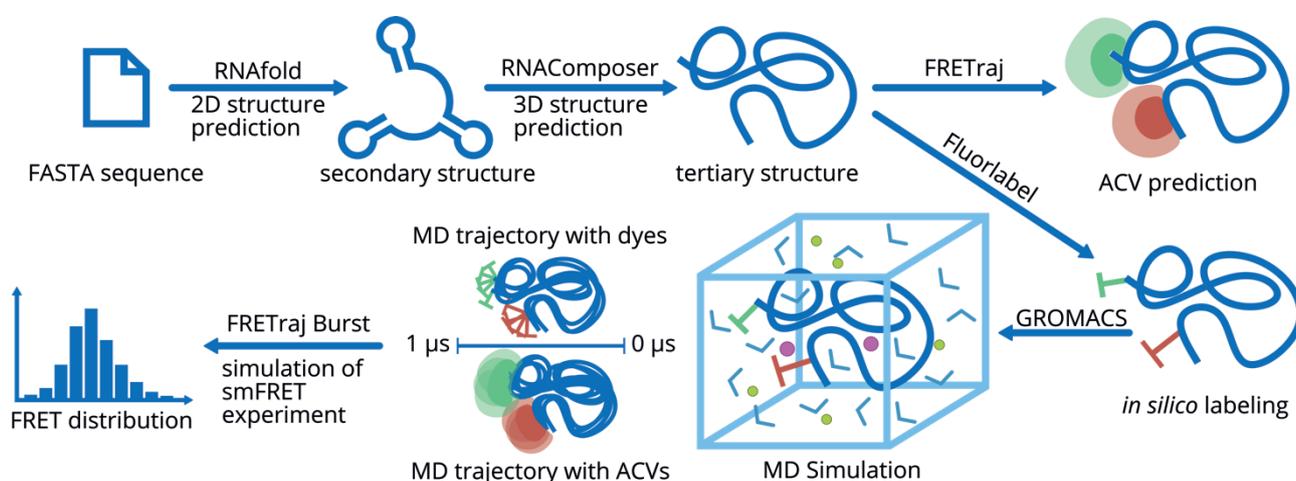


Figure 1: FRET assisted structural modeling pipeline for an RNA structure.

## References

- [1] P. Nissen et al., RNA tertiary interactions in the large ribosomal subunit: the A-minor motif, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2001, 98, 4899–4903.
- [2] S. Gerhardy, M. Oborská-Oplová, L. Gillet, R. Börner et al., Puf6 primes 60S pre-ribosome nuclear export at low temperature, *Nat. Commun.* 2021, 12, 4696
- [3] F. Erichson, F. D. Steffen, and R. Börner, FRET-assisted structural model of the GAAA RNA tetraloop receptor 2021, 230–233. [Online]. Available: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:mit1-opus4-122837>
- [4] F. D. Steffen, R. K. O. Sigel, and R. Börner, FRETraj: Integrating single-molecule spectroscopy with molecular dynamics, *Bioinformatics* 2021
- [5] M. Hoefling and H. Grubmüller, In silico FRET from simulated dye dynamics, *Comput. Phys. Commun* 2013, 184, 841–852.

# Prozesscharakterisierung des Laserstrahlauftragschweißens an Al-Si-Legierungen zum Zweck der Instandsetzung von Gussteilen

Michael Güpner<sup>1</sup>, Tristan Drawert<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Heiko Lange<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

<sup>2</sup>ICS Industrielleistungen GmbH, Am Schliffter 5, 06571 Roßleben

*Al-Si-Legierungen werden bevorzugt zur Fertigung von Druckgusserzeugnissen eingesetzt. Die Einsatzbereiche für diese sind sehr vielschichtig und erstrecken sich über viele Branchen, wie bspw. die Automobil- und Luftfahrtindustrie. Wegen der komplexen Prozessführung und der Vielzahl an Einflussgrößen unterliegt der Gussprozess mittleren Ausschussraten von ca. 10 %. Dabei führen kleinste Defekte, wie Poren oder Gestaltabweichungen im Bereich von Dichtflächen dazu, dass die Funktionalität des Bauteils nicht mehr gegeben ist. In diesem Fall wird das Bauteil wieder der Schmelzebeschickung zugeführt und erneut gegossen. Daraus resultieren Leerzeiten in nachgelagerten Prozessschritten oder eine Überproduktion. Ein Ansatz um dies zu umgehen, stellt die Instandsetzung der Defektstellen mittels automatisiertem Laserauftragschweißen dar. In der vorliegenden Veröffentlichung erfolgte dazu eine umfassende Prozesscharakterisierung. Prozessgrenzen, die Optimierung des Aufmischungsgrades und die Adaption des Energieeintrages beim Volumenaufbau wurden untersucht.*

---

# Virtuelle Produktoptimierung von Lasermaterialbearbeitungsanlagen

Andreas Hopf<sup>1</sup>, Michael Güpner<sup>1</sup>, Christian Rochholz<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Tino Dannenberg<sup>2</sup>, Dominik Kühn<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade, 07745 Jena

<sup>2</sup>Dynardo GmbH an Ansys Company, Steubenstraße 25, 99423 Weimar

<sup>3</sup>LightTrans International UG, Kahlaische Str. 4, 07745 Jena

*Ein übergeordnetes Ziel ist es, neue Untersuchungs- und Simulationsmethoden zu entwickeln, die es gestatten, bereits in einer frühen Produktentwicklungsphase ganzheitlich quantitative und prädiktive Aussagen hinsichtlich der physikalischen und thermomechanischen Eigenschaften des Produktes vorherzusagen bzw. treffen zu können. Im Mittelpunkt stehen dabei die thermisch induzierten Störgrößen, die zu Fokus-Shift, Strahlageinstabilitäten oder aber Änderungen der Strahlungsintensität führen, welche besonders kritisch bei der Verwendung von hochbrillanten Laserstrahlquellen sind. Diese Einflussgrößen sind derzeit nicht realistisch vorhersagbar bzw. höchstens auf eine Domäne, als optimierte Vorhersage in der Entwicklung von neuen Lasermaterialbearbeitungsanlagen möglich. Hierzu soll eine Kopplung von optischer, thermischer und mechanischer Simulation (gekoppelte Multiphysikmodelle) zur Auslegung von Strahlführungs- und Strahlformungselementen für eine Lasermaterialbearbeitungsanlage durchgeführt werden.*

---

# Unerwartete Debrisablagerungen bei der Ultrakurzpuls-Multispot-Bearbeitung

Sebastian Kraft<sup>1</sup>, Tong Zhou<sup>2</sup>, Jörg Schille<sup>1</sup>, Walter Perrie<sup>2</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

<sup>2</sup> Laser Group, School of Engineering, University of Liverpool, Brownlow Street, Liverpool L69 3GH, UK

*Moderne Hochleistungslaser mit ultrakurzen Pulsdauern benötigen angepasste Prozessregime zum effizienten Umsatz der hohen bereitgestellten optischen Leistungen bei der Materialbearbeitung. Eine Möglichkeit ist die Aufteilung des Laserstrahles in mehrere Teilstrahlen zur simultanen Bearbeitung. Erste Ergebnisse in diesem Regime zeigten spezielle Anordnungen des sich wieder abgelagerten Materials auf der Materialoberfläche. Diese Anordnungen wurden bei verschiedenen geometrischen Pulsabständen, Pulsenergien und Pulsanzahlen reproduzierbar erzeugt. In Abhängigkeit der Parameter der Multispots-Ablation und der resultierenden unterschiedlichen Interaktionen konnten neben runden Debris-Anordnungen auch Materialjets aus agglomerierten Partikeln oder Anhäufungen des Debris zwischen den Laserspots erzeugt werden. Die Materialjets erreichen Ausdehnungen von bis zu mehrerer Hundert Mikrometer.*

*Modern ultra-short pulse high-power laser systems require special regimes to gain a high efficiency while material processing. One possibility is the splitting of the laser beam in multi spots for a simultaneous ablation. While the ablation the debris forms different patterns of re-deposited material at the material surface. Two experimental set-ups are used to examine experiments with a stainless steel specimen. This special debris patterns could be re-produced while varying the pulse energy, pulse number and lateral pulse distance. The different interaction between the two pulses and especially their ablation plumes generates besides from the round debris also material jets or a filament between the laser spots. The jet out of agglomerated material can reach up to several hundreds of micrometres away from the actual point of the laser-material-interaction.*

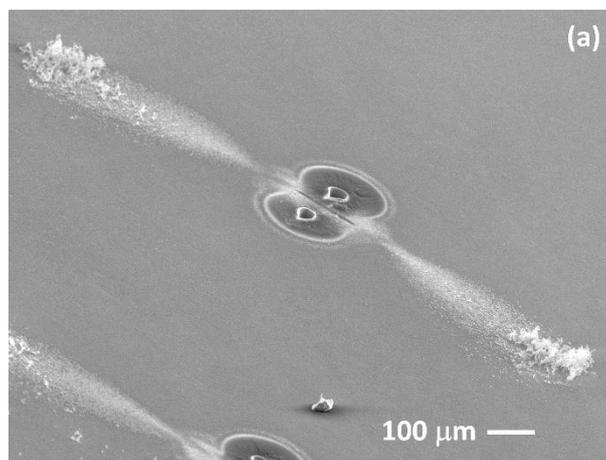


Abbildung 1: REM-Aufnahme der Materialjetablagerung bei der 5 kHz UKP-Multispot-Bearbeitung von Edelstahl

# Excitation and ablation of P3HT with spectral shaped ultrafast mid-IR laser radiation

Philipp Lungwitz, Theo Pflug, Markus Olbrich, Alexander Horn  
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

*The resonant vibrational excitation and ablation of organic materials is of particular interest for processing materials such as organic semiconductors. Processing organic materials with UV or VIS laser radiation is state of the art whereas mid-IR radiation is usually used for analytics. Laser systems with pulse durations of a few ten femtoseconds in the mid-IR spectral range allow to create ablation structures using nonlinear absorption. The ablation threshold fluence of thin organic films of the organic semiconductor poly(3-hexylthiophen) (P3HT) using single pulsed ultrafast mid-IR laser radiation is determined depending on pulse durations, spectral widths and group velocity dispersions (GVD). So, changing of ablation characteristics can be used to describe different regimes of excitation.*

Processing of organic thin films by ultrafast mid-IR laser radiation is a quite new approach. Contrary to the conventional ablation by UV to VIS laser radiation, mid-IR radiation enables the resonant excitation of the vibrational modes of the organic molecules and therefore a new processing mechanism. However, due to the high intensities of ultrafast laser radiation, additionally to the vibrational excitation, nonlinear tunnel ionization can be probable and become the dominating excitation process. A customized commercial spectral pulse shaper is applied, to tune the pulse duration, spectral bandwidth and the group velocity dispersion of the used mid-IR laser radiation, and therefore, affect the probability for the linear and nonlinear excitation mechanisms. The ablation efficiency depending on the pulse duration, bandwidth and group velocity dispersion is investigated by determining the ablation threshold fluence of the organic semiconductor P3HT, due to single pulse irradiation. First results demonstrate a decreasing ablation threshold fluence with decreasing pulse durations and with negative group velocity dispersion.

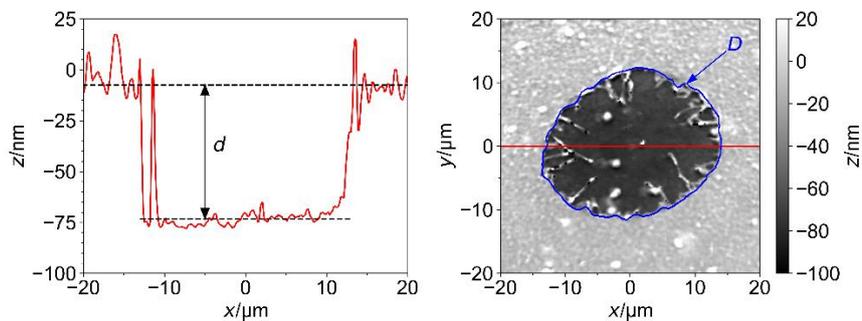


Fig. 1: Exemplary ablation structure of a thin film of P3HT and investigation of the processed area for calculating the effective diameter  $D$  to determine ablation threshold fluence

# Optimierung eines optischen Aufbaus für die kombinierte TIRF-/konfokale Mikroskopie

Hannes Michaelsen, Anxiong Yang, Richard Börner

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Diese Arbeit befasst sich mit dem Aufbau eines Mikroskops für die kombinierte TIRF- und konfokale Mikroskopie auf Grundlage des MiCubes [1] eines bereits bestehenden Konzeptes für ein Totale Interne Reflexion Fluoreszenz-Mikroskop (TIRFM). Diese Form der Mikroskopie ist Stand der Technik in der Einzelmolekülspektroskopie [2] und soll in Forschung und Lehre der Biophotonik an der Hochschule Mittweida Anwendung finden. Als Ausgangspunkt dient der MiCube [1], welcher an der Universität Wageningen entwickelt wurde. Der Aufbau wurde dabei so angepasst, dass sowohl TIRF als auch konfokale Messungen möglich sind. Zudem können gleichzeitig zwei Wellenlängen detektiert werden, was Grundvoraussetzung für Einzelmolekül-FRET Untersuchungen ist. Der gesamte Aufbau kann dabei schon für 31.000 Euro realisiert werden. Dieses Projekt fand mit freundlicher Unterstützung der Hochschule Mittweida, des SMWK sowie dem Werner-Legat Fond der Universität Zürich statt.

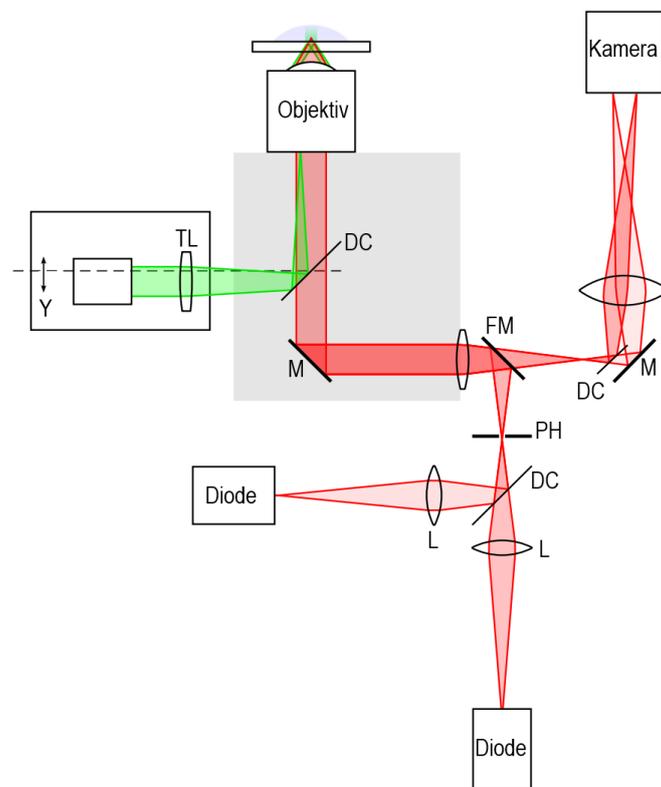


Abb. 1: Strahlengang für den kombinierten Aufbau von TIRFM und konfokaler Mikroskopie.

## Referenzen

- [1] Martens, K. J. A. *et al.* Visualisation of dCas9 target search in vivo using an open-microscopy framework. *Nature Communications* **10**, 3552 (2019).
- [2] Hellenkamp, B. *et al.* Precision and accuracy of single-molecule FRET measurements-a multi-laboratory benchmark study. *Nature methods* **15**, 669–676 (2018).

# Bestrahlung einer dicken Goldschicht mit Einzelpulsen von ultrakurz gepulster Laserstrahlung

Markus Olbrich, Theo Pflug, und Alexander Horn

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Die Bestrahlung einer dicken Goldschicht (Schichtdicke  $d_z = 1000$  nm) auf einem Glassubstrat mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung (Pulsdauer  $\tau_H = 40$  fs, Wellenlänge  $\lambda = 800$  nm) wird in Abhängigkeit von der Spitzenfluenz  $H_0$  der Laserstrahlung im Bereich von  $1.0 - 8.0$  J/cm<sup>2</sup> untersucht. Dabei wird die Topologie der Abtragsstrukturen mittels Laserscanning-Mikroskopie bestimmt und die Dynamik des Abtrages mittels quasi-zweidimensionaler Modellierung der Temperaturverteilung der Elektronen- und Phononentemperatur sowie der Hydrodynamik simuliert. Die Modellierung wird zusätzlich durch orts- und zeitaufgelöste Reflektometrie validiert. Basierend auf den Ergebnissen der Modellierung kann die Topologie der Abtragsstrukturen durch das Zusammenspiel von Abtrag an der Vorder- und Rückseite der Schicht sowie die Verformung des Substrates durch die emittierten Verdichtungs- und Verdünnungswellen erklärt werden.

In Abhängigkeit von der Fluenz der Laserstrahlung sowie von der Zeit nach der Bestrahlung mit Einzelpulsen von ultrakurz gepulster Laserstrahlung entstehen verschiedene Abtragsregime bzw. Teilbereiche innerhalb der Wechselwirkungszone des Materials mit der Laserstrahlung (Abb. 1). So wird kein Material (1) zwischen der Vorder- (an der Grenzfläche Vakuum-Schicht) und der Rückseite (an der Grenzfläche Schicht-Substrat), oder festes Material an der Rückseite (3) der Schicht abgetragen, durch Spallation an der Vorderseite (4) und der Rückseite (2) entsteht ein schaumartiges Gemisch, welches an der Vorderseite durch den Rückstoß des durch Phasenexplosion entstehenden Flüssigkeits-Gas-Gemisches (6) zu einer Schicht aus flüssigem Material (5) wieder verdichtet wird. Die Charakterisierung sowie die Beschreibung der Dynamik der genannten Teilbereiche durch einen Vergleich von Modellierung [1], orts- und zeitaufgelöster Reflektometrie [2, 3] sowie Topologie der erhaltenen Abtragsstrukturen erfolgt in dieser Arbeit.

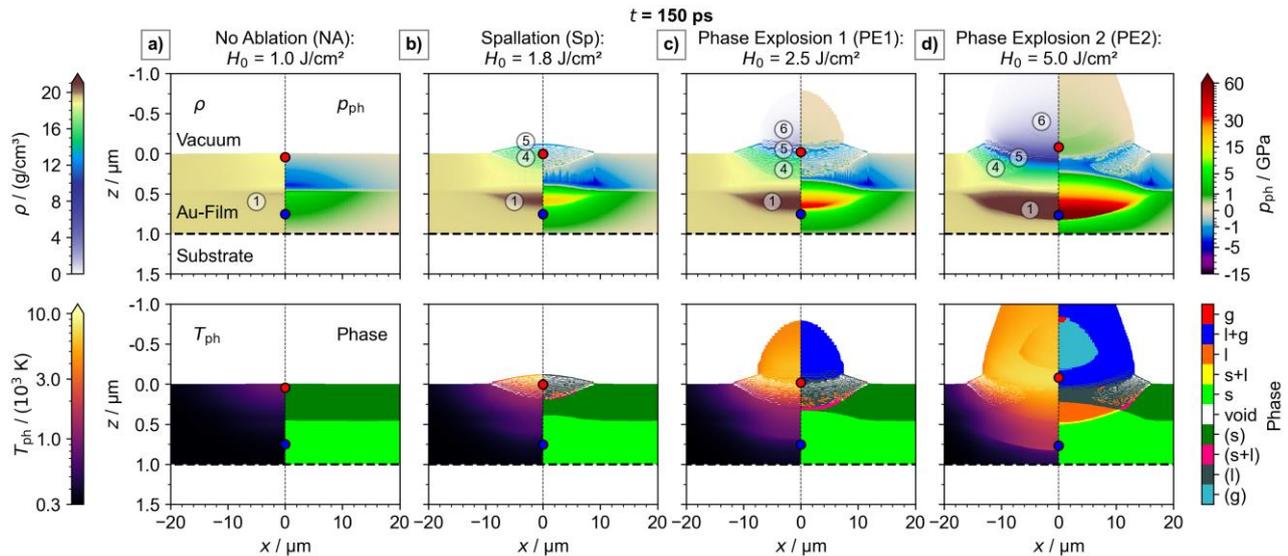


Abb. 1 Simulierte quasi-zweidimensionale Verteilung des Druckes des Phononensystems  $p_{ph}$ , der Dichte  $\rho$ , der Temperatur des Phononensystems  $T_{ph}$  sowie des Phasenzustandes einer dicken Goldschicht ( $d_z = 1000$  nm) 150 ps nach der Bestrahlung mit Einzelpulsen von ultrakurz gepulster Laserstrahlung ( $\tau_H = 40$  fs,  $\lambda = 800$  nm) für eine Spitzenfluenz  $H_0$  von a)  $1.0$  J/cm<sup>2</sup> (kein Abtrag), b)  $1.8$  J/cm (Spallation), c)  $2.5$  J/cm<sup>2</sup> (Phasenexplosion 1) und d)  $5.0$  J/cm<sup>2</sup> (Phasenexplosion 2). Das Substrat wurde für eine übersichtliche Darstellung entfernt und die Grenzfläche Schicht Substrat als gestrichelte Linie dargestellt.

## Referenzen

- [1] Olbrich M, Pflug T, Wüstefeld C, Motylenko M, Sandfeld S, Rafaja D et al. Hydrodynamic modeling and time-resolved imaging reflectometry of the ultrafast laser-induced ablation of a thin gold film. Opt Lasers Eng 2020;129:106067.
- [2] Pflug T, Wang J, Olbrich M, Frank M, Horn A. Case study on the dynamics of ultrafast laser heating and ablation of gold thin films by ultrafast pump-probe reflectometry and ellipsometry. Appl. Phys. A 2018;124(2):17572–9.
- [3] Pflug T, Olbrich M, Roesch R, Schubert US, Hoppe H, Horn A. Investigations on the modification of PMMA by ultrafast laser radiation from the UV to the mid-IR spectral range. Opt Lasers Eng 2018;111:130–4.

# Ultraschnelle zeit- und orts aufgelöste Reflektometrie an der Rückseite von Goldschichten verschiedener Schichtdicke

Markus Olbrich, Theo Pflug, Florian Lull und Alexander Horn  
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Die Bestrahlung von Goldschichten verschiedener Schichtdicke ( $d_z = 50 \text{ nm}$ ,  $200 \text{ nm}$  und  $400 \text{ nm}$ ) auf einem Glassubstrat (Dicke ca.  $1 \text{ mm}$ ) mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung (Pulsdauer  $\tau_H = 40 \text{ fs}$ , Wellenlänge  $\lambda = 800 \text{ nm}$ ) wird in Abhängigkeit von der Spitzenfluenz  $H_0$  der Laserstrahlung mit Hilfe von ultraschneller zeit- und orts aufgelöster Reflektometrie ( $\tau_H = 60 \text{ fs}$ ,  $\lambda = 440 \text{ nm}$ ) an der Rückseite der Schicht untersucht. Die gemessene Dynamik der relativen Änderung des Reflexionsgrades wird mittels quasi-zweidimensionaler Modellierung der Temperaturverteilung der Elektronen- und Phonontemperatur sowie der Hydrodynamik erklärt, wobei die Änderungen des Reflexionsgrades für Verzögerungszeit von weniger als  $10 \text{ ps}$  vorwiegend durch die Elektronentemperatur und für größere Verzögerungszeiten vorwiegend durch die Dynamik der Grenzfläche Schicht-Substrat bestimmt werden.

Ultraschnelle Messtechnik [1,2] erlaubt die Bestimmung der optischen Antwort des Materials und ermöglicht in Verbindung mit der Modellierung des Abtrages [3] den Abtrag von Material induziert durch ultrakurz gepulste Laserstrahlung zu verstehen. Die starke Streuung und Absorption der Probe-Laserstrahlung innerhalb der Ablationswolke über dem Wechselwirkungsbereich der Pump-Laserstrahlung mit dem Material erlaubt jedoch keine Aussagen in einem Zeitbereich von einigen  $10 \text{ ps}$  bis einigen  $\text{ns}$ , da kein Signal gemessen werden kann. Durch die Durchführung der ultraschnellen Messtechnik, hier Reflektometrie, an der Rückseite der Schicht (Abb. 1) ist der störende Einfluss der Ablationswolke nicht vorhanden und ergänzt dadurch die Messungen an der Vorderseite der Schicht. So kann z. B. direkt die Wärmeleitung durch eine Variation der Schichtdicke (Abb. 1 a) oder die Dynamik Grenzfläche Schicht-Substrat (Abb. 1 b) als Folge der induzierten Verdichtungs- und Verdünnungswellen gemessen werden.

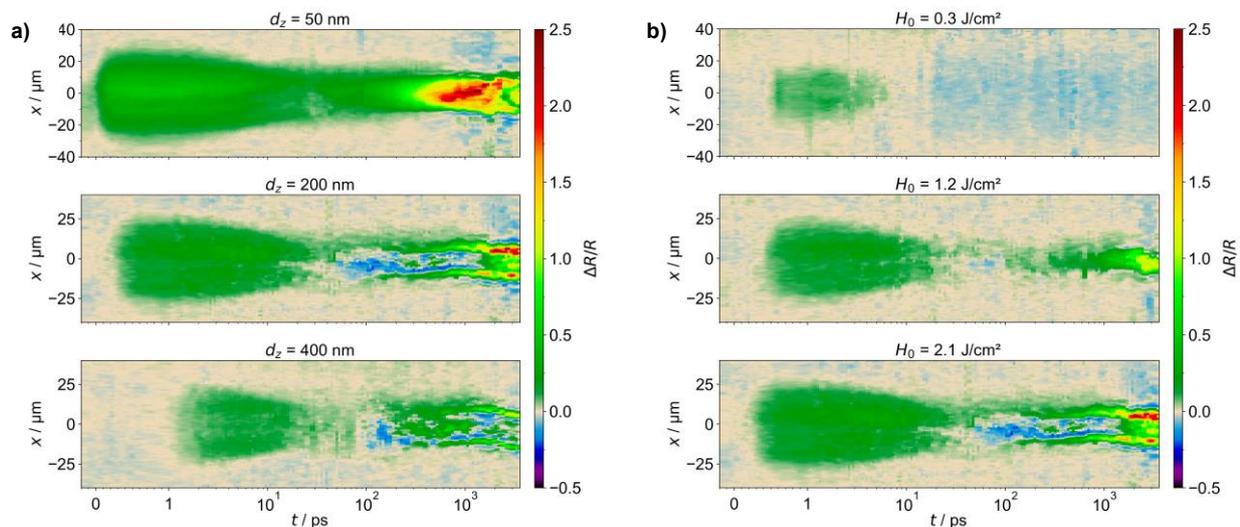


Abb. 1 Experimentell bestimmte zeit- und ortsabhängige relative Änderung des Reflexionsgrades an der Rückseite von a) Goldschichten mit einer Dicke  $d_z$  von  $50 \text{ nm}$ ,  $200 \text{ nm}$  und  $400 \text{ nm}$  für eine Fluenz  $H_0 = 1,5 H_{\text{thr}}$  bezogen auf die Schwellfluenz  $H_{\text{thr}}$  zum kompletten Abtrag der jeweiligen Schicht und b) einer Goldschicht mit einer Dicke von  $200 \text{ nm}$  für verschiedene Fluenzen jeweils nach der Bestrahlung mit Einzelpulsen von ultrakurz gepulster Pump-Laserstrahlung ( $\tau_H = 40 \text{ fs}$ ,  $\lambda = 800 \text{ nm}$ ,  $\theta = 45^\circ$ ) und gemessen mit der Probe-Laserstrahlung ( $\tau_H = 60 \text{ fs}$ ,  $\lambda = 440 \text{ nm}$ ,  $\theta = 180^\circ$ ) durch das Glassubstrat mit einer Dicke von ca.  $1 \text{ mm}$ .

## Referenzen

- [1] Pflug T, Wang J, Olbrich M, Frank M, Horn A. Case study on the dynamics of ultrafast laser heating and ablation of gold thin films by ultrafast pump-probe reflectometry and ellipsometry. Appl. Phys. A 2018;124(2):17572–9.
- [2] Pflug T, Olbrich M, Horn A. Surface Modifications of Poly(methyl methacrylate) Induced by Controlled Electronic and Molecular Vibrational Excitation Applying Ultrafast Mid-IR Laser Radiation. J. Phys. Chem. C 2019;123(33):20210–20.
- [3] Olbrich M, Pflug T, Wüstefeld C, Motylenko M, Sandfeld S, Rafaja D et al. Hydrodynamic modeling and time-resolved imaging reflectometry of the ultrafast laser-induced ablation of a thin gold film. Opt Lasers Eng 2020;129:106067.

# Grundlagen zur laserinduzierten Schockwellenanregung in Asphaltkörpern

Manuel Pfeiffer, Jörn Hübelt, Steffen Weißmantel  
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Ziel dieser Untersuchungen war die Erforschung der Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen optoakustischen Messtechnologie für eine mobile, zerstörungsfreie Bestimmungsmethode des strukturellen Zustands von Asphaltfahrbahnen. Diese basiert auf der Impulseinkopplung hochenergetischer Laserpulse, die in die Fahrbahnoberfläche eingetragen werden und aus der Auswertung der Ausbreitungs- und Reflexionsmustern der so generierten Körperschallwellen. Hierfür wurden in einem ersten Schritt Laborversuche zur generellen Signalgenerierung durch laserinduzierte Schockwellen in Asphaltkörpern vorgenommen und deren potenziellen Ausbreitungsreichweite für die Anwendung auf realen Asphaltfahrbahnen untersucht. Für die Untersuchung an den Asphaltprobekörpern wurde eine Excimerlaser-Strukturierungsanlage mit einem integrierten KrF-Excimerlaser LPX Pro 305F (Wellenlänge 248 nm, Pulsdauer 30 ns, Pulswiederholfrequenz 1-50 Hz & maximale Pulsenergie 1,2 J) verwendet.

## Abschätzung der laserinduzierten Signalreichweite für Asphaltfahrbahnen

Für die Simulation der Signalreichweite wurden die in den Laboruntersuchungen durch laserinduzierte Signalanregung bestimmten Beschleunigungssignalverläufe der Körperschallwellen in Asphaltprobekörpern mit der an einer realen Asphaltfahrbahn durch mechanische Anregung bestimmten Signalabschwächungsfunktion kombiniert. Die daraus resultierenden Ergebnisse für eine Abschätzung der Ausbreitungsreichweite von laserinduzierten Schockwellen in Asphalt sind für unterschiedliche Pulsrepetitionraten in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt.

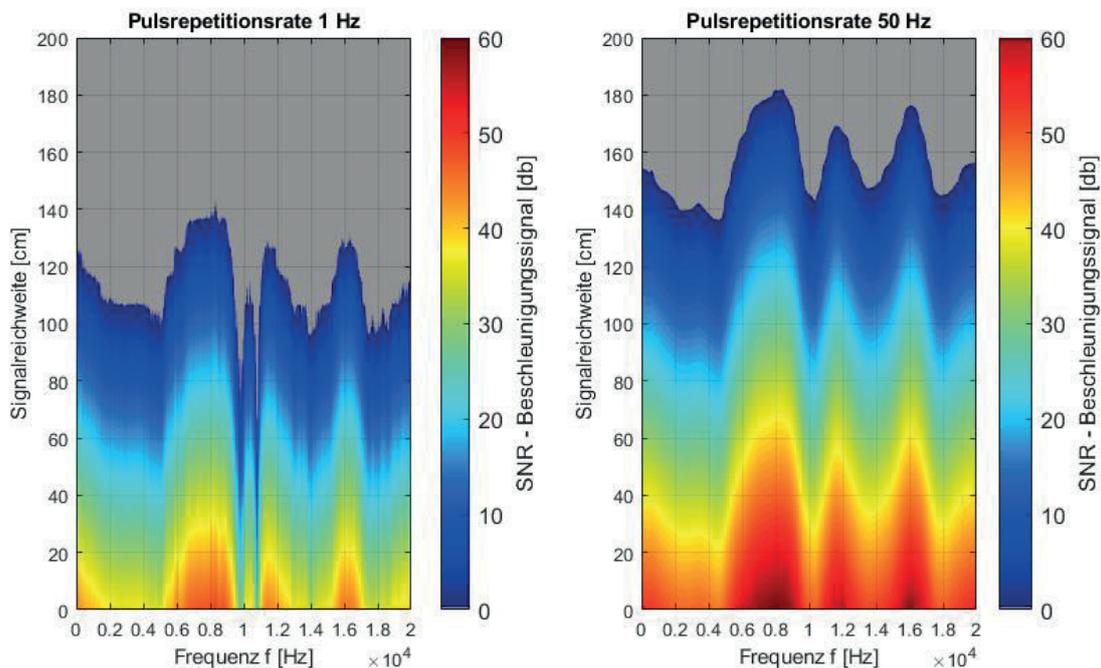


Abb. 1: Frequenzabhängige simulierte Reichweite des Beschleunigungssignals (SNR - Signal-Rausch-Verhältnis) der laserinduzierten Körperschallwelle in einer Asphaltfahrbahn für unterschiedliche Pulsrepetitionraten (links: 1 Hz, rechts: 50 Hz) bei einer Pulsenergie von 332 mJ.

# RNA fluorescence labelling strategies for biophotonic assays

Vanessa Schumann, Richard Börner

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

*Elucidating the function of RNA on a structural and dynamic basis is imperative to gain a complete understanding of life at the molecular level. To fully understand the role of RNAs, it is necessary to study how RNAs function both in the ensemble and at the single-molecule level. This will help to assess how even low populated states of RNA complexes might affect the overall function of the cell<sup>1</sup>. Therefore, we make use of single-molecule fluorescence studies of biomolecules (especially RNA) to gain both, kinetic and thermodynamic information that is usually lost in ensemble experiments due to ensemble averaging effects<sup>2</sup>. Therein, the in vitro construct design of the RNA molecule of interest and its fluorescent labelling is of central importance when fluorescence techniques will be applied. Herein, we present a fluorescence labelling technique for RNA to be used for biophotonic assays, the coupling reaction of N-hydroxysuccinimide ester (NHS ester) with a primary amino group as a useful strategy for postsynthetic fluorescent modifications of RNAs<sup>3,4</sup>.*

## RNA labeling with NHS ester and the principle of FRET

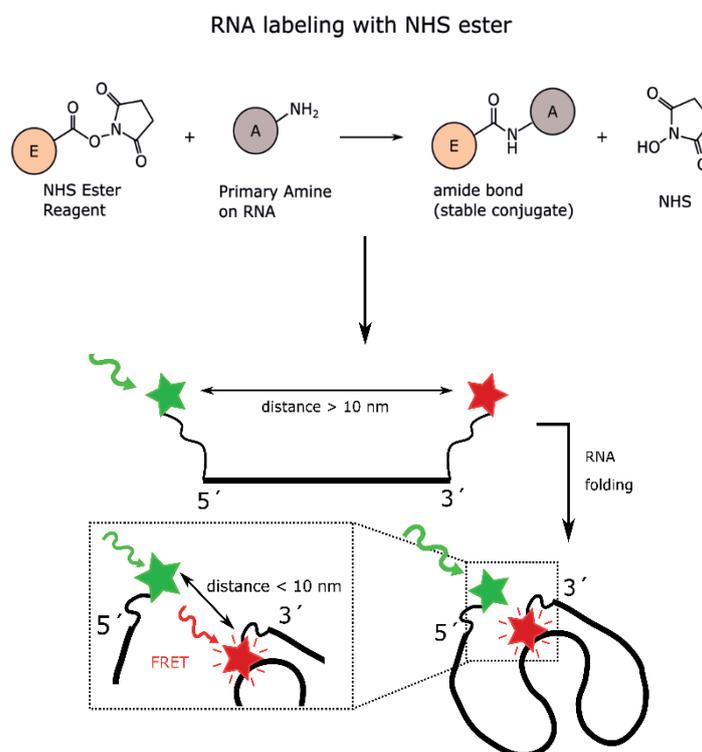


Fig. 1: NHS ester reaction scheme and FRET principle: Conjugation of NHS-Ester modified Dye (E) to a primary amine on RNA molecule (A). The RNA is labeled with two fluorescent dyes. During RNA folding, the dye molecules come into spatial proximity to each other. Excitation of the donor dye (green) transfers energy to the acceptor molecule (red) which emits a measurable FRET signal.

## References

- [1] G. Hanspach et al. "Strategic labelling approaches for RNA single-molecule spectroscopy". In: RNA Biology (2019)
- [2] M. Zhao et al. "Site-specific dual-color labeling of long RNAs for single-molecule spectroscopy". In: Nucleic Acids Research (2018).
- [3] M. Li "Optimization of N-hydroxysuccinimide ester coupling with aminoallyl-modified RNA for fluorescent labeling" In: BIOENGINEERED (2020)
- [4] F. D. Steffen, R. Börner, R. K.O. Sigel, E. Freisinger "Stick, flick, click - DNA-guided fluorescent labeling of longRNA for single-molecule FRET", In: Chimia (2019)

# Melting point analysis of the metal ion dependent NA tertiary contact formation: a case report

Philipp Vierig, Richard Börner

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Germany

The stability of the 3 dimensional fold of a (deoxy)ribonucleic acids (D)RNA depends on the primary structure, i.e., the composition of nucleotides as sequence. The helical structure of an RNA is only conditionally stable in aqueous solution and depends on the particular sequence and buffer conditions, e.g. the concentration of mono and divalent metal ions such as potassium ( $K^+$ ) or sodium ( $Na^+$ ) as well as magnesium ( $Mg^{2+}$ ) or calcium ions ( $Ca^{2+}$ ). Upon increasing the temperature, the base-paired, i.e. the double stranded regions of the folded RNA, dissociate and "melt" into two single strands. A common experimental setup to measure the thermal melting of RNA is performed with a UV spectrophotometer by recording the base absorbance at 260 nm as a function of temperature usually between 20 and 90°C. The principle of such an experiment was presented more than 30 years ago [1] and is nowadays a standard in many laboratories [2]. The experimental measure for a thermal melting curve can also be a fluorescence emission signal [3], the intensity of an NMR peak [4], a change in circular dichroism (CD) [5], or a Raman signal [6]. Herein, we present two different methods for melting point measurement: the UV absorption and the fluorescence emission. We describe the steps for sample preparation and data analysis. As an example, we use a DNA hairpin loop in different potassium ion concentrations.

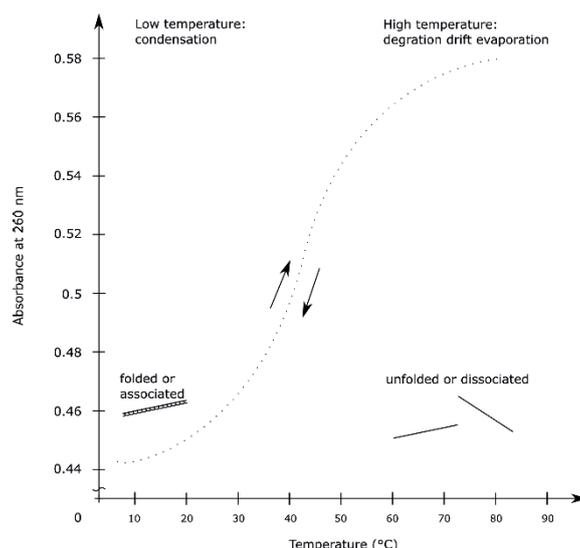


Fig. 1: Thermal denaturation curve corresponding to a parallel bimolecular duplex. Adapted from [1]

## References

- [1] THOMAS, R. (1993). The denaturation of DNA. *Gene* 135, 77–79.
- [2] GUISETT-MISERACH, H., DONGHI, D., BÖRNER\*, R., JOHANNSEN\*, S., and SIGEL\*, R.K.O. (2016) Distinct differences in metal ion specificity of RNA and DNA G-quadruplexes. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 21, 975.
- [3] MERGNY, J.L., and MAURIZOT, J.C. (2001). Fluorescence resonance energy transfer as a probe for G-quartet formation by a telomeric repeat. *ChemBioChem* 2, 124–132.
- [4] CAHEN, P., LUHMER, M., FONTAINE, C., MORAT, C., REISSE, J., and BARTIK, K. (2000). Study by Na<sup>23</sup>-NMR, H-1-NMR, and ultraviolet spectroscopy of the thermal stability of an 11–basepair oligonucleotide. *Biophys. J.* 78, 1059–1069.
- [5] GUO, Q., LU, M., and KALLENBACH, N.R. (1992). Adenine affects the structure and stability of telomeric sequences. *J. Biol. Chem.* 267, 15293–15300
- [6] DUGUID, J.G., BLOOMFIELD, V.A., BENEVIDES, J.M., and THOMAS, G.J., Jr. (1996). DNA melting investigated by differential scanning calorimetry and Raman spectroscopy. *Biophys. J.* 71, 3350–3360.

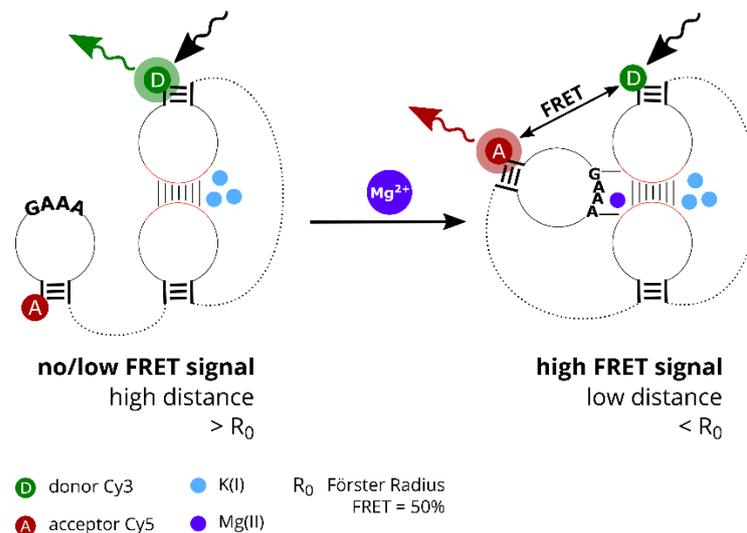
# FRET studies of fluorescently labelled RNA biomolecules with the help of Fluoroskan Ascent FL

Anne Katrin Winkler, Richard Börner

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

The formation of secondary and tertiary structural elements and the associated native structure of nucleic acid provides essential insights into the functional purpose of this fascinating biomolecule in the scientific field of molecular biology and biophotonics<sup>1</sup>. We study the folding into secondary and tertiary structures as well as the thermodynamic stability of RNA and DNA structures using Förster resonance energy transfer (FRET). FRET is a distance-dependent energy transfer from a donor to an acceptor dye covalently attached to the biomolecule of interest<sup>2</sup>. Using the fluorescence spectrometer Fluoroskan Ascent FL, fluorescence intensity values of the RNA or DNA construct are measured under various conditions (pH, metal ions ect.) yielding FRET values<sup>4</sup>. Herein, we present the FRET results including the sample preparation and data analysis. We use an RNA construct which has been recently characterized<sup>3</sup> labelled with the dyes sCy3 (donor) and sCy5 (acceptor), which we study at different temperatures as well as increasing concentrations of potassium(I) and magnesium(II) ions.

## How FRET works:



Within the RNA folding process the RNA shows the binding of a GAAA-tetraloop motif to a kissing loop upon addition of Mg(II). Through the folding process, the donor and acceptor dye converge and a fluorescence intensity value is detectable. The positions of the metal ions are only for illustration.

## References

- [1] A. Y. Sim *et al.*, Current opinion in structural biology **2012**, 22(3), 273-278
- [2] M. Dahan *et al.*, Ratiometric measurement and identification of single diffusing molecules **1999**, Chemical Physics 247, 85-106
- [3] S. Gerhardy *et al.*, Puf6 primes 60S pre-ribosome nuclear export at low temperature **2021**, Nat. Commun., 12, 4696
- [4] K. Mitte, 21. Nachwuchswissenschaftler\*innenkonferenz – Tagungsband **2021**, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, 143-145

# Sponsoring

## 3D-Micromac AG - Micromachining Excellence



Die 3D-Micromac AG ist der führende Spezialist für Lasermikrobearbeitung. Unsere Experten entwickeln Verfahren, Maschinen und komplette Anlagen auf höchstem technischen und technologischen Niveau. Weltweit kommen diese in zahlreichen Hightech-Industrien erfolgreich zum Einsatz. Dazu gehören sowohl die Photovoltaik-, Halbleiter-, Glas- und Displayindustrie als auch die Mikrodagnostik und die

Medizintechnik. Dabei ist es unser Anspruch, Kundenwünsche auch bei komplexen Projekten perfekt zu erfüllen. 3D-Micromac steht für leistungsfähige und zukunftsorientierte Prozesse mit größter Produktionseffizienz. Mit unseren Technologien setzen wir internationale Standards und schaffen Innovationen. Weil es uns besonders wichtig ist, unser Knowhow kontinuierlich auszubauen, haben wir stets die neuesten Forschungsergebnisse im Blick. Diese verknüpfen wir in unserer täglichen Arbeit mit den Anforderungen unserer Kunden in der Praxis.

Kontakt:

3D-Micromac AG

Technologie-Campus 8

D-09126 Chemnitz

Tel: +49 371 400 43 - 222

Fax: +49 371 400 43 - 40

E-Mail: [sales@3d-micromac.com](mailto:sales@3d-micromac.com)

Web: <https://3d-micromac.com>



## LIM Laserinstitut Mittelsachsen GmbH

Die LIM Laserinstitut Mittelsachsen GmbH führt für ihre Kunden diskret und flexibel Forschung zu speziellen Lasermaterialbearbeitungstechnologien sowie Dienstleistungen mit Laserverfahren aus, die nicht im Laser Job Shop angeboten werden. Dafür stehen der gesamte Anlagenpark des exzellent ausgestatteten Laserinstitut Hochschule Mittweida und derzeit 15 motivierte Mitarbeiter zur Verfügung.

Es werden solch hochspezialisierte Verfahren wie Laserpulsabscheidung von Hartstoffschichten zum Verschleißschutz, Mikrostrukturierung durch Schichtabtrag für Sensoren, Mikroschneiden und Mikrobohren mit ultrakurzen Pulsen und UV-Laser für hochpräzise Masken, Hochratelaserbearbeitung mit Monomode-Faserlaser zum extrem schnellen Schneiden verschiedenster Werkstoffe oder zur effektiven Oberflächenbearbeitung, Lasermikrostrukturierung mit UKP-Lasern mittels Polygonspiegelscanner und das weltweit einmalige Lasermikrosintern zur Generierung von Mikrostrukturen mit höchster Auflösung für Kundenapplikationen untersucht und teilweise in Kleinserien umgesetzt. Gemeinsam mit den Kunden werden so in kurzer Zeit eigenständige Lösungen fernab vom Mainstream gefunden, die einen großen Know-how Vorsprung garantieren.

Die Tradition der Laserforschung an der Hochschule Mittweida reicht bereits über 40 Jahre zurück. Der langjährige Erfahrungsschatz kommt auch den Kunden der GmbH zugute. Pro Jahr werden 100 - 150 Aufträge im Umfang von 100 bis 100.000 Euro bearbeitet.

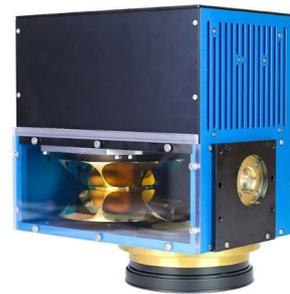


## MOEWE Optical Solutions GmbH

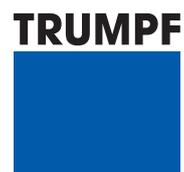
Die MOEWE Optical Solutions GmbH wurde im August 2018 als Startup aus dem Laserinstitut Hochschule Mittweida ausgegründet. Sie ist ein junges dynamisches Unternehmen mit derzeit 6 Mitarbeitern. Das internationale Team hat eine ausgewiesene Expertise in den Bereichen Lasertechnik, Optik, Mechanik, Digitalelektronik und Programmierung.

Das erste Produkt ist ein volldigitalisierter Polygonspiegelscanner mit exklusiven Eigenschaften wie großer Apertur, Kompaktheit, hoher Genauigkeit, Echtzeitfähigkeit, Synchronisierbarkeit und hoher Laserstrahlbelastbarkeit.

MOEWE Optical Solutions GmbH | Leipziger Straße 27 | 09648 Mittweida  
03727/9989407 | info@moewe-optik.de | www.moewe-optik.de



# Firmenausstellung zur 12. Mittweidaer Lasertagung





## ACSYS Lasertechnik GmbH

ACSYS ist Technologieführer bei hochpräzisen Maschinen für die Lasermaterialbearbeitung und nimmt am Markt weltweit eine Spitzenstellung ein. Namhafte Kunden

aus unterschiedlichsten Zielbranchen nutzen den Mehrwert der ACSYS Technologie zur Optimierung Ihrer Produktionsprozesse. Sie profitieren vom konzentrierten Know-how eines Spezialisten-Teams, das sein Wissen mit Visionskraft und Innovationsdynamik zum Einsatz bringt.

Im Bereich Forschung und Entwicklung arbeitet ACSYS gemeinsam mit Forschungspartnern und Instituten kontinuierlich an der Verbesserung und Weiterentwicklung von Technologien rund um das Werkzeug Laser, immer mit dem Ziel die Grenzen des Möglichen neu zu definieren und den Kunden optimierte, neuartige Lösungen zur Verfügung stellen.

ACSYS Lasertechnik GmbH  
Leibnizstraße 9  
DE 70806 Kornwestheim  
T: +49 7154 808 75 0

Leipziger Straße 37  
DE 09648 Mittweida  
T: +49 3727 996 909 0

info@acsys.de  
www.acsys.de



## APE Angewandte Physik & Elektronik GmbH

APE ist ein weltweit operierender Entwickler und Hersteller von Geräten aus dem Bereich ultrakurzer Laserpulse. Zum Portfolio zählen Autokorrelatoren, Spektrometer und weitere Pulsdiagnostik-Systeme. Das Unternehmen gehört zudem zu den internationalen Marktführern im Bereich der Wellenlängen-Konversion und bietet außerdem passendes Zubehör wie z. B. Pulspicker und Systeme für die Dispersionskompensation an.

Um den wachsenden Markt der Ultrakurzpuls-Lasertechnik zu unterstützen, setzt APE einen deutlichen Schwerpunkt im Bereich Forschung und Entwicklung. Damit können schnell auf Wünsche und Anregungen des Marktes reagiert werden; das reicht von Auftragsentwicklung, kundenspezifische Gerätevarianten bis hin zu OEM Fertigung.

Ein Team aus qualifizierten Spezialisten entwickelt Geräte höchster Qualität und intuitiver Bedienbarkeit, die in eigener mechanischer und optischer Fertigung produziert werden. Der weltweite Vertrieb erfolgt teils direkt, teils über Distributoren. Seit 2010 ist APE mit der APE Inc. in Vancouver, WA, USA, im nordamerikanischen Markt direkt vertreten.

Die erstklassige Qualität der APE-Präzisionsgeräte sowie kompetente und zuverlässige Kundenbetreuung sind Standards, mit denen das Unternehmen den hohen Ansprüchen eines sich konstant in Bewegung befindenden Marktes begegnet. Es wird ein sehr enger Kontakt zu den Kunden gepflegt um die Produkte permanent zu verbessern und weiterzuentwickeln.

APE Angewandte Physik & Elektronik GmbH  
Plauener Straße 163-165 | Haus N  
13053 Berlin – Germany  
Tel +49 30 98601130  
Email: sales@ape-berlin.de  
Web: www.ape-berlin.de

Bewegung ist unsere Leidenschaft.

Wir erzeugen und führen Bewegung mit Produkten der Antriebstechnik. Weltweit. Von der Einzelkomponente bis zum mechatronischen System. Von der Medizin-technik bis zur Photovoltaik. Von der Werkzeugmaschine bis zur Automatisierung. Unsere Produkte finden ihren vielfältigen Einsatz im Maschinenbau der verschiedensten Branchen.

HIWIN GmbH  
Brücklesbünd 1  
77654 Offenburg

+49 781 932 78 0  
info@hiwin.de  
www.hiwin.de



**Profilschienenführungen**  
Führen mit Präzision - steif, spielfrei, exakt. Profilschienenführungen ermöglichen exakte Linearbewegungen von der Mikropositionierung bis zur Schwerlastwerkzeugmaschine.



**Rundtische**  
Drehen auf den Punkt: Einbaufertige Drehachsen mit spielfreien Direktantrieben.



**E1**  
Antriebsverstärker für Linear-, Servo- und Torquemotoren - universell einsetzbar.



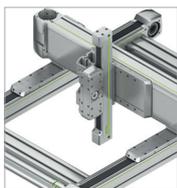
**Kugelgewindetriebe**  
Kugelgewindetriebe vom Weltmarktführer - für jede Positionieraufgabe die passende Spindel.



**Torquemotoren**  
Direktantriebe mit weitem Drehzahlpektrum für Werkzeugmaschinen und die Automatisierung.



**DATORKER**  
Wellgetriebe für große Übersetzungen mit vielfältigen Einsatzmöglichkeiten.



**Linearachsen**  
Individuell konfigurierbares Baukastensystem: Linearachsen und Mehrachssysteme für Positionieraufgaben in der Automatisierung.



**Lager**  
Lagereinheiten - passgenau für Kugelgewindetriebe.



**Linearmotoren**  
Linear-Direktantriebe für unterschiedliche Anforderungen - Linearmotorkomponenten zum individuellen Achsaufbau sowie einbaufertige Linearmotor-Achssysteme.



## LLT Applikation GmbH

### PRECISION TO PERFECTION - Auftragsfertigung & Maschinen für die Lasermikrobearbeitung

Die LLT Applikation GmbH ist Maschinenbauer und Fertigungsdienstleister mit knapp 25 Jahren Erfahrung in der Laser-Präzisions- und Mikrobearbeitung. Wir entwickeln und fertigen industrielle Serienmaschinen zur mikrometer-genauen 2D- & 3D-Laserbearbeitung

unterschiedlichster Materialien. Darüber hinaus produzieren wir als Dienstleister Präzisionsbauteile für Hightech-Branchen wie Medizintechnik, Optik oder Mikroelektronik. Aufgrund unseres besonderen Know-hows ist unser Unternehmen zudem ein gefragter Kooperationspartner für Industrie sowie Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Unsere vier standardisierten Maschinenkonzepte können mit verschiedenen Strahlquellen vom Faser- bis hin zum Femtosekundenlaser ausgestattet und bei Bedarf kundenspezifisch angepasst werden. Dabei verlässt jede Anlage unsere Produktionshallen mit einem optimierten und stabil laufenden Prozess und wird im Normalfall als schlüsselfertiges System übergeben, das nach Installation und Endabnahme sofort die Produktion aufnehmen kann. Die bis zu 3 µm präzisen Maschinen kommen sowohl bei unseren Kunden als auch in unserer eigenen zertifizierten Auftragsfertigung zum Präzisionsschneiden, -schweißen, -bohren und -strukturieren zum Einsatz. Daneben verfügen wir über eine besondere Expertise in der hochgenauen und schonenden Bearbeitung von Präzisionsrohren und decken vom Prototypen über Einzelteile bis hin zu Klein- und Großserien eine Vielzahl von Losgrößen ab.

Die Nähe zur Technischen Universität Ilmenau und das Engagement in verschiedenen Netzwerken fördern unseren Innovationsgedanken mit F&E-Projekten und qualifizierten Mitarbeitern. Belohnt werden diese Bemühungen seit jeher mit positiven Geschäftszahlen, Wachstum und Innovationspreisen.

Kontakt:

LLT Applikation GmbH  
Am Vogelherd 51  
98693 Ilmenau

Tel.: +49 (0) 3677 46 33 0  
Sales@LLT-Applikation.de  
www.LLT-Applikation.de



Laserpräzisionsanlage LLT.micro



## MKS Instruments - Ophir Brand

Roland Heinze  
Guerickeweg 7 - 64291 Darmstadt  
Tel. 06151 708 - 0

[www.ophiropt.com](http://www.ophiropt.com)  
Roland.Heinze@mksinst.com



Ophir, eine Marke der Light & Motion Division von MKS Instruments, Inc., bietet eine breite Palette an Messtechnik für Laser und LEDs, darunter Leistungs- sowie Energiesensoren und Strahlprofilmessgeräte sowie leistungsstarke IR-Wärmebildobjektive und Optiken für CO<sub>2</sub>- und Hochleistungs-Faserlaser. Die modularen, individuell anpassbaren Lösungen werden rund um die Welt in Fertigung, Medizintechnik, im militärischen Bereich und der Forschung eingesetzt. Weitere Informationen finden Sie unter [www.ophiropt.com](http://www.ophiropt.com)



Mit Ophir Ariel präsentiert MKS auf der 12. Mittweidaer Lasertagung unter anderem ein universelles und eigenständiges Leistungsmessgerät für Laser. Das kompakte System misst Laserleistungen von 200 mW bis 8 kW, deckt unterschiedliche Wellenlängenbereiche ab und ist gleichzeitig so klein, dass es auf die Handfläche passt.

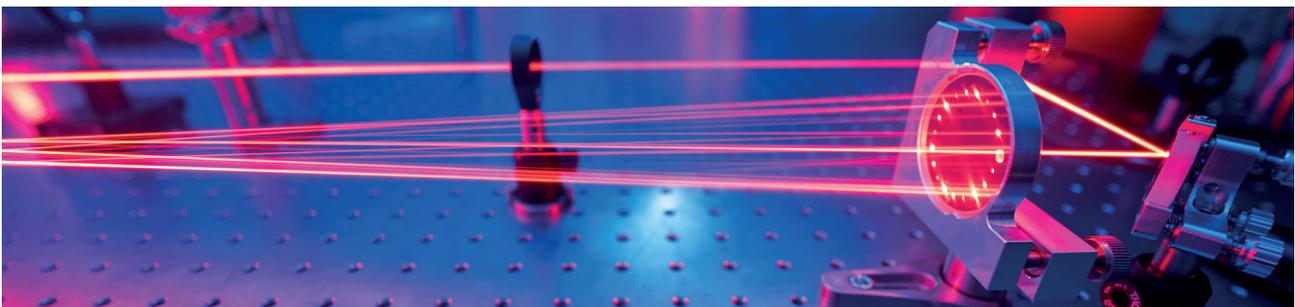
Ähnlich kompakt, aber speziell für automatisierte Umgebungen konzipiert wurde das Ophir Helios Plus Leistungsmessgerät. Das kompakte System verfügt über verschiedene industrielle Schnittstellen, ist ebenfalls sehr robust und misst bis zu 12 kW sowohl im IR- als auch im blau/grün-Spektrum ohne Wasserkühlung. Gezeigt wird ebenfalls die berührungslose Messtechnik der BeamWatch Produktfamilie.

## n2-Photonics



### Enabling new applications with ultrashort laser pulses

The n2-Photonics team receives the prestigious "EXIST Forschungstransfer" funding for the development of a market-ready technology for spectral broadening of ultrashort laser pulses.



Ultra-short pulse lasers have become indispensable in research and industry. They are used in a wide range of applications, for example, in modern microscopy, in time-resolved observation of fast chemical reactions, and in material processing of ever smaller structures for medical technology or quantum computers. To meet the rapidly growing demand for femtosecond lasers with ever shorter pulse durations, the n2-Photonics team has set itself the goal of bringing an innovative pulse shortening process to market. The technology, developed during five years of research work, is unique and novel worldwide. It is characterized by **unprecedented robustness and lifetime combined with unsurpassed small pulse durations and peak performance**. The technology combines the success of fiber-based approaches with the advantages of proven and robust free space optics.

The team has started at the Chair of Laser Technology and Spectroscopy under the mentorship of Prof. Dr. Oleg Pronin at Helmut Schmidt University (HSU) in Hamburg in January 2021. Currently the team is in the final phase of product development and is **looking forward to coupling their add-on module to your existing laser** to help you enable new applications with laser pulses of <50 fs.

Contact:

Christian Franke | [christian.franke@n2-photonics.de](mailto:christian.franke@n2-photonics.de) | [www.n2-photonics.de](http://www.n2-photonics.de)

Seit über 25 Jahren entwickelt und fertigt PRIMES Geräte zur Diagnose von Laserstrahlung für die industrielle Anwendung. Ausgehend vom FocusMonitor zur Vermessung der Strahlqualität stehen heute verschiedene Geräte zum Messen der Strahlqualität und Leistung von Laserstrahlung zur Verfügung.

Die Bandbreite der Geräte umfasst:

- Messen der Leistungsdichteverteilung in der Bearbeitungszone
- Messen der Strahlkaustik im Fokus und bei freilaufendem Strahl
- Messen von Laserleistungen im Multikilowattbereich
- Messen kleinster Fokusradien und Strahleigenschaften von Lasern mit hoher Brillanz oder kurzer Pulsdauer

Die Entwicklung und Anwendung der Geräte werden durch Tests im eigenen Laserlabor unter realen Einsatzbedingungen unterstützt und die Funktionalität durch das eigene Kalibrierlabor abgesichert.

PRIMES steht für Innovation und Kompetenz in Sachen Strahldiagnose. Mit rund 120 Mitarbeitern arbeitet am Firmensitz in Pfungstadt ein hoch motiviertes Team, international unterstützt durch ein Netz von Distributoren in Europa, Amerika, Asien und Australien sowie einer Tochtergesellschaft in Japan.

Mit den Strahldiagnosegeräten von PRIMES stehen dem Anwender modernste Geräte mit innovativen Messverfahren zur Verfügung. Funktionalität und Verlässlichkeit der Geräte werden durch vollständige Eigenentwicklung, hohe Eigenfertigungstiefe sowie durch anwendungsorientierte Validierung und Abnahme für jedes Gerät gewährleistet. Das Lösen von anspruchsvollen Messaufgaben in der industriellen Fertigung bis hin zur Forschung und Verfahrensentwicklung, gemeinsam mit den Fachleuten vor Ort, ist die Stärke von PRIMES.

Für neue Herausforderungen im Bereich der Laserstrahldiagnose stehe ich Ihnen als Ansprechpartner gern zur Verfügung:



Stephan Holesch  
Technischer Vertrieb  
Mail: s.holesch@primes.de



Die SCANLAB GmbH ist mit über 35.000 ausgelieferten Systemen jährlich der weltweit führende und unabhängige OEM-Hersteller von Scan-Lösungen zum Ablenken, Positionieren und Führen von Laserstrahlen. Die schnellen und besonders präzisen Galvanometer-Scanner, Scan-Systeme und Ansteuerlösungen werden in Deutschland entwickelt und mit höchsten Qualitätsstandards in Puchheim bei München hergestellt.

#### Produktspektrum

- Galvanometer-Scanner
- Scan-Systeme (2D/3D)
- Z-Achsen und 3D-Erweiterungen
- Steuerungselektronik
- Software & Kalibrierlösungen
- Erweiterte Scan-Lösungen

#### Anwendungsgebiete

- Industrielle Lasermaterialbearbeitung (z. B. Markieren, Schweißen, Schneiden, Bohren, Additive Fertigung / 3D-Druck, Solarzellenfertigung, Mikro-Materialbearbeitung)
- Bio- und Medizintechnik (z. B. Ophthalmologie, Dermatologie, konfokale Mikroskopie, OCT)
- Wissenschaft und Forschung (z.B. DNA-Sequenzierung, Laserprozess-Entwicklung)

#### Technologie- und Entwicklungsschwerpunkte

- Hochdynamische und hochpräzise Galvanometer-Scanner
- Digitale, hochintegrierte Positionsdetektoren
- Intelligente Regelungskonzepte (z.B. vorausschauende Regler)
- Industrietaugliches Hochgeschwindigkeits-Scannen mit UKP-Lasern



SCANLAB GmbH  
Siemensstr. 2a  
82178 Puchheim

Telefon  
E-Mail  
Web

+49 89 800746-0  
info@scanlab.de  
www.scanlab.de



## TOPAG Lasertechnik GmbH

Über uns:

TOPAG Lasertechnik GmbH bietet Produkte aus den Bereichen Laser und optische Messtechnik an. Der Schwerpunkt liegt auf dem Vertrieb und Service von UKP-Lasern für Anwendungen in Forschung und Industrie. Das Unternehmen entwickelt und fertigt neuartige diffraktive Optiken zur Laserstrahlformung.

Individuelle Beratung, kundenspezifisch angepasste Lösungen und eine langfristige, vertrauensvolle Zusammenarbeit mit unseren Kunden bilden seit der Gründung im Jahr 1993 die Basis für den Unternehmenserfolg.

TOPAG präsentiert neue Produkte für die Mikromaterialbearbeitung:

- Neuer Femtosekunden-Laser **FemtoLux30** für die industrielle Materialbearbeitung: 30 W @ 1030 nm, >90 µJ maximale Pulsenergie, >250 µJ mit Burst Mode, bis 4 MHz Repetitionsrate, innovatives wartungsfreies Kühlkonzept.
- Zuverlässiger Industrie-Femtosekunden-Laser **Carbide mit 80 W**, bis zu 2 mJ Pulsenergie, variable Pulslänge von 250 fs bis 10 ps und Repetitionsraten bis 2 MHz. Der neuartige BiBurst mit Burst-in-Burst-Funktion eröffnet vollkommen neue Möglichkeiten in der hochpräzisen Mikromaterialbearbeitung.
- Neuer **Top Hat Strahlformer** GTH-S-5.0-16.0 aus Quarzglas für UKP-Laseranwendungen mit höchsten Leistungsdichten. Die Top Hat-Größe kann durch Wahl der fokussierenden Optik variabel angepasst werden, einsetzbar vom UV bis IR. Damit lassen sich quadratische, homogene Strahlprofile in der Größe von 500 µm bis 50 mm erzeugen.

### Kontakt:

Ansprechpartner: Dr. Erwin Jäger

Tel: +49 6151 42944-0

Email: [jaeger@topag.de](mailto:jaeger@topag.de)

Web: [www.topag.de](http://www.topag.de)

## TRUMPF

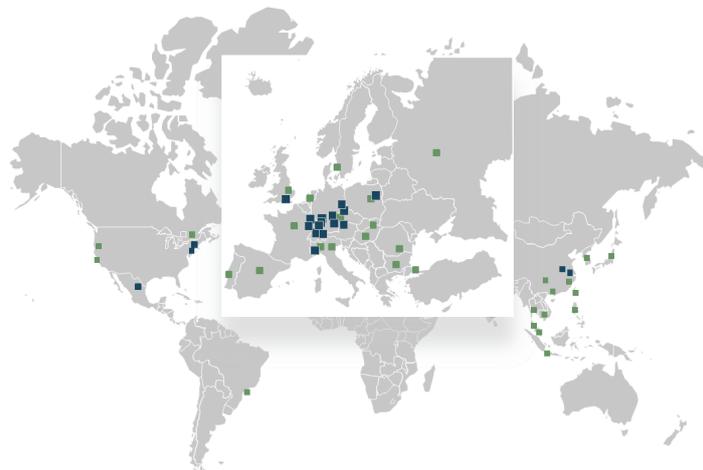


## TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH

Das Hochttechnologieunternehmen TRUMPF bietet Fertigungslösungen in den Bereichen Werkzeugmaschinen und Lasertechnik. Die digitale Vernetzung der produzierenden Industrie treibt das Unternehmen durch Beratung, Plattform- und Softwareangebote voran. TRUMPF ist Technologie- und Marktführer bei Werkzeugmaschinen für die flexible Blechbearbeitung und bei industriellen Lasern.

Mit mehr als 80 Tochtergesellschaften ist die Gruppe in fast allen europäischen Ländern, in Nord- und Südamerika sowie in Asien vertreten. Produktionsstandorte befinden sich in Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Österreich und der Schweiz, in Polen, Tschechien, den USA, Mexiko und China.

Weitere Informationen über TRUMPF finden Sie unter: [www.trumpf.com](http://www.trumpf.com)



# Firmenausstellung zur 12. Mittweidaer Lasertagung

## - Nachtrag -

### SITEC Industrietechnologie GmbH

# SITEC

SITEC ist ein international geschätzter Partner und Systemlieferant für automatisierte High-Tech Produktionsanlagen und der Serienfertigung von Präzisionsteilen und Baugruppen.

Basierend auf höchsten Qualitäts- und Umweltstandards bietet SITEC effiziente Fertigungstechnologien sowie schlüsselfertige Komplettlösungen.

Dem Einsatz innovativer Technologien widmen wir unsere ganze Aufmerksamkeit. SITEC entwickelt für seine Kunden der Automobilindustrie, Elektronik und Halbleiterindustrie, Medizintechnik und alternativen Energietechnik serienreife Lösungen zur Lasermaterialbearbeitung, elektrochemischen Metallbearbeitung und automatisierten Montage. Das gelingt dem Unternehmen mit hoch motivierten und qualifizierten Mitarbeitern und einem optimalen Teamwork. SITEC wächst dabei mit den Herausforderungen seiner Kunden und des Marktes, wie beispielsweise der Entwicklung neuer Produkte im Bereich der E-Mobilität oder autarker Speichertechnologien auf Basis von Brennstoffzellen. Vollautomatisierte Laserbearbeitungsanlagen zum Laserschweißen insbesondere von Kupfer für Bauteile im E-Antrieb, Batteriesystem und der Leistungselektronik gehören heute zum Portfolio. Das 1991 gegründete Unternehmen mit Hauptsitz in Deutschland bedient asiatische Märkte direkt vor Ort über die SITEC Laser Technology (Shanghai) und betreibt in den USA (Pittsburgh) einen Showroom.

SITEC Industrietechnologie GmbH | Bornaer Straße 192 | 09114 Chemnitz  
| Germany  
[www.sitec-technology.de](http://www.sitec-technology.de)

