Laserinstitut Hochschule Mittweida

HOCHSCHULE MITTWEIDA
University of Applied Sciences

Tagungsunterlagen

14. Mittweidaer Lasertagung

18. und 19. Juni 2025 an der Hochschule Mittweida

www.lasertagung-mittweida.de

INHALTSVERZEICHNIS

Programmüberblick - Mittwoch, 18. Juni 007

Keynote-Vortrag

Quantum imaging with undetected light – From fundamentals to holography with quantum light 010
Sebastian Töpfer, Sergio Tovar Perez, Jonas Vasikonis, Markus Gräfe
TU Darmstadt, Deutschland

Session 1: Hochgeschwindigkeits-Laserbearbeitung

Hollow-core Fiber Beam Delivery of High-Power Ultrashort Pulses for Industrial Laser Applications 012
Sebastian Eilzer, Paul Froemel, Andreas Rudolf
PT Photonic Tools, Deutschland

Hocheffizientes Ultrakurzpuls-Laserabtragen mit langen GHz-Laserbursts 013
Jörg Schille[1], Stefan Mauersberger[1], Guillaume Bonamis[2], Eric Audouard[2], Sebastian Kraft[1], Clemens Hönninger[2], Udo Löschner[1]
1: Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland
2: Amplitude, Frankreich

Hochdynamische Laserstrukturierung und -funktionalisierung von Werkzeugoberflächen mittels Polygonscankopf und DLIP 014
Christian Mikley[1], Florian Rößler[2], André Streek[2,3], Tim Kunze[4]
1: ACSYS Lasertechnik GmbH, Deutschland
2: MOEWE Optical Solutions GmbH, Deutschland
3: Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland
4: Fusion Bionic GmbH, Deutschlad

Ablation von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen mit ultrakurzen Burst-Pulsen 015
Philipp Rebentrost, Daniel Metzner, Steffen Weißmantel
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Active Fiber Loop (AFL) in femtosecond laser FemtoLux 30 – Innovations in Material Micromachining 016
Deividas Andriukaitis
Ekspla, Lithuania

Session 2: Ultrakurzpulslaserbearbeitung

Laserbasierte Mikroumformung von Borosilikatglas: neue Möglichkeiten der Ultrakurzpulslaserbearbeitung 018
Marina Skiba[1], Jens Bliedtner[1], Andrés Fabián Lasagni[2]
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Deutschland
2: Technische Universität Dresden, Deutschland

Abtragung verschiedener Materialien mit sub-100 fs-Pulsen 019
Gregor Hehl[1], Kilian Fritsch[2], Rashad Esloughi[1], Cheriyan Varghese[1], Moinuddin Kadiwala[1], Oleg Pronin[1,2]
1: Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, Deutschland
2: n2-Photonics GmbH, Deutschland

UKP-Fügen von transparenten Kunststoffen 020
Robert Schmidt[2], Jan Rücker[1]
1: Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH
2: Ernst-Abbe-Hochschule Jena University of Applied Sciences

Irreversible Materialveränderungen von einkristallinem Silizium nach Bestrahlung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung 021
Andy Engel, Markus Olbrich, Theo Pflug, Alexander Horn
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Exposition von Röntgenstrahlung bei der Materialbearbeitung unter Schutzgas in UKP-Laseranlagen 022
Günter Dittmar
Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. G. Dittmar, Deutschland

Session 3: Lasertechnik und Sonderverfahren

Klebstofffreies Fügen von Papier durch laserbasierte Materialmodifikation 024
Florian Lull[1], Volker Franke[1], Fabian Kayatz[2], Mathias Kott[2], Grethel Iturralde[2], Robert Protz[3], Andre Lehmann[3], Christer-Clifford Schenke[4], Stephan Kronenberger[4]
1: Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS
2: Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV
3: Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung IAP
4: Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Wer bremst verliert - Feinstaub, wie können wir das verhindern? 025
Peter Leipe
SITEC Industrietechnologie GmbH, Deutschland

Sperrte neXt - Neue Fertigungstechnologien für Komponenten und Systeme der dezentralen Energietechnik 026
Tim Sahm, Dirk Dittrich, Christoph Wilsnack
Fraunhofer IWS, Deutschland

Einfluss von Laserparametern auf die Bildung Ohmscher Kontakte bei SiC-Bauelementen mittels Rückseiten-Annealing 027
Maurice Clair
3D-Micromac AG, Deutschland

3D-Bearbeitung und Prozesskontrolle in der Direkten Laserinterferenzstrukturierung 028
Christoph Zwahr, Frederic Schell, Tobias Steege
Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik

Programmüberblick - Donnerstag, 19. Juni 029

Keynote-Vortrag

Kleine Partikel, große Wirkung. Wie lasergenerierte Nanopartikel den 3D-Druck veredeln 032
Anna Rosa Ziefuss, Stephan Barcikowski
Technische Chemie 1 und Zentrum für Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE), Universität Duisburg- Essen, Deutschland

Session 4: Additive Fertigung

Investigating the Impact of Femtosecond Laser Parameters on the Microstructure in Additive Manufacturing of 8YSZ 034
Markus Kühn[1], Sarah Kaden[1], Jens Bliedtner[1], Patrick Hähle[2], Daniel Störzner[2]
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Deutschland
2: LCP Laser Cut Processing GmbH

Untersuchungen zum selektiven Laserstrahlschmelzen von Aluminiumoxid für die direkte Herstellung oxidkeramischer Bauteile 035
Laura Römer, Adrian Forkert, Martin Erler, André Streek
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Entwicklung einer Pilotanlage für das laserbasierte Pulverbettschmelzen von Glas 036
Anne-Marie Layher[1], Felix Thumann[1], Thekla Boeckh[1], Lisa Tewes[1], Peter Schirmer[2], Johannes Rösler[2], Jens Bliedtner[1]
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena
2: Rösler CeramInno GmbH

Makro-SLM: Materialien, Anwendungsbeispiele und Herausforderungen 037
Martin Erler, Sebastian Weinhold, Andreas Kotsch, Michael Pfeifer, André Streek
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Session 5: Laseroberflächentechnik

Erzeugung von spannungsfreien Schichten aus kubischem Bornitrid (c-BN) mittels Laserpulsabscheidung (PLD) und Laserpuls-Entspannung 039
Falko Jahn, Steffen Weißmantel
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Combining laser processing with atmospheric pressure plasma jet etching 040
Robert Heinke[1,2], Martin Ehrhardt[1], Pierre Lorenz[1], Klaus Zimmer[1], Thomas Arnold[1,2]
1: IOM Leipzig, Deutschland
2: TU Dresden, Deutschland

Stoßwellenbasierte Oberflächenreinigung von Insektenrückständen mittels CO2 Laser 041
Anika Langebeck[1], Lewin Rathmann[1], Tim Radel[1,2]
1: BIAS - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, Deutschland
2: MAPEX - Center for Materials and Processes - Universität Bremen, Deutschland

Session 6: Lasermesstechnik

Inline-Hochgeschwindigkeits-Infrarotmessung zur Prozesskontrolle bei der Bearbeitung von Diffusionsmedien für Brennstoffzellen mittels Ultrakurzpulslaser 043
Alexander Kaiser, Sebastian Funken, Harald Riegel
Hochschule Aalen, Deutschland

Optische Inspektion komplexer Strukturen auf Basis physikalisch interpretierbarer neuronaler Netze 044
Peter Hartmann, Leander Kläber, Alexander Kabardiadi-Virkovski, Tobias Baselt, Christopher Taudt
Fraunhofer IWS, Deutschland

Rekonstruktion der Ablationsdynamik einer dünnen Goldschicht 045
Markus Olbrich, Theo Pflug, Andy Engel, Alexander Horn
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Abschlussvortrag

Ultraschnelle optische Messtechniken für die Lasermaterialbearbeitung 047
Alexander Horn, Andy Engel, Phillip Börner, Markus Olbrich
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Posterbeiträge

Charakterisierung der durch ultrakurz gepulste Laserstrahlung erzeugten 049
Ablationswolke mit zeitlicher, räumlicher und spektraler Auflösung
Phillip Börner, Markus Olbrich, Andy Engel, Alexander Horn
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Entwicklung einer laserbasierten Technologie zur fälschungssicheren Markierung von.....050
additiv gefertigten Bauteilen mit optischen Mikrostrukturen
Kerstin Götze, Andreas Hopf, Elena Wettemann, Jens Bliedtner
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Deutschland

Lasermikrostrukturierung zur Oberflächenfunktionalisierung von Spritzgussformen 051
Andreas Gruner, Jörg Schille, Udo Löschner
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Effizienzbetrachtungen beim pulverbasierten DED-LB/M von Warmarbeitsstahl 052
Michael Güpner[1], Sebastian Böttcher[1], Frank Rempt[1], Jens Bliedtner[1], Henning Zeidler[2]
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena
2: Technische Universität Bergakademie Freiberg

Entwicklung eines additiven Verfahrens zur direkten Fertigung komplexer Glasbauteile.....053
mittels Faser-Extrusions-Technologie
Robin Hassel[1], Denis Just[1], Andreas Hopf[1], Jens Bliedtner[1], Robert Müller[2], Jan Dellith[2]
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Deutschland
2: Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V., Deutschland

Entwicklung eines Laserstrahlschneidprozesses für die effiziente Bearbeitung von.....054
keramischen Kompositmaterialien
Andreas Hopf, Kerstin Götze, Jens Bliedtner
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Deutschland

Validierung eines 3D-Laserdruckverfahrenes zur Herstellung von formgebenden..... 055
und dabei wasserabführenden Oberflächen
Matthias Horn, Jörg Schille, Lucas Naumann, Udo Löschner
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Femtosekundenlaser-gestützte LPBF-Prozessentwicklung für hochauflösenden 056
PA12-3D-Druck
Markus Kühn[1], Felix Thumann[1], Andrea Barz[1], Jens Bliedtner[1], Sebastian Matthes[2], Markus May[2], Daniel Störzner[3]
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Deutschland
2: 3Faktur GmbH
3: LCP Laser-Cut-Processing GmbH

Laserbasiertes Pulverbettschmelzen von Glasmaterialien mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung 057
Anne-Marie Layher[1], Sarah Kaden[1], Jens Bliedtner[1], Olaf Schumann[2], Christina Schütze[2], Johannes Buchheim[3], Arne Teiwes[3], Christian Rieck[3], Patrick Hähle[4], Daniel Störzner[4]
1: Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Deutschland
2: IL Metronic Sensortechnik GmbH
3: Glatt Ingenieurtechnik GmbH
4: LCP Laser-Cut-Processing GmbH

Untersuchungen zur Erzeugung von Mikrostrukturen mit großen Wandwinkeln mittels ultrakurzer Laserpulse 058
Peter Lickschat[1], Kristin Beyreuther[2], Konstantin Härtel[2], Antje Zösch[2], Steffen Weißmantel[1]
1: Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland
2: imq - Ingenieurbetrieb GmbH, Crimmitschau

Innovative a-C/ta-C-Multischichtsysteme: Eigenschaften und Herstellung durch Laserpulsabscheidung 059
Daniel Metzner, Falko Jahn, Steffen Weißmantel
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Einfluss zeitlicher Pulsabstände ultrakurzer Laserpulse auf die SiO_2-Ablation 060
Jonas Opitz, Peter Lickschat, Daniel Metzner, Manuel Pfeiffer, Philipp Rebentrost, Steffen Weißmantel
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Zerstörungsfreie und berührungslose Bestimmung des E-Moduls unter Verwendung der laserinduzierten Schockwellenanregung 061
Manuel Pfeiffer, Ertac Celik, Jörn Hübelt, Steffen Weißmantel
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland

Flächengravierung von Spritzgusswerkzeugen mittels Hochgeschwindigkeits-Polygon-scanner 062
Marcel Wolf[1], Gianluca Deninno[2], Andrè Streek[1], Nello Li Pira[2], Tanja Onofrio[3], Alessio Onofrio[3]
1: Laserinstitut Hochschule Mittweida, Deutschland
2: Centro Ricerche Fiat, Italy
3: Onostampi S.R.L., Italy

Surfalize – Eine Python-Bibliothek zur Oberflächenanalyse 063
Frederic Schell[1], Christoph Zwahr[1], Andrés Fabián Lasagni[1,2]
1: Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik
2: Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden

Sponsoring 064

Firmenausstellung 067

Stand Drucklegung: 26.05.2025

Programm - 14. Mittweidaer Lasertagung

Mittwoch, 18.06.2025 – Programmüberblick

9:20 - 9:40 5-120	Eröffnung der 14. Mittweidaer Lasertagung durch den Rektor der Hochschule Mittweida, Prof. Dr. Volker Tolkmitt und den Institutsdirektor des Laserinstitut Hochschule Mittweida, Prof. Dr. Alexander Horn
9:40 - 10:20 5-120	Keynote-Vortrag: **Quantum imaging with undetected light – From fundamentals to holography with quantum light** Markus Gräfe, TU Darmstadt
10:20 - 10:40 5-120	Session 1: Hochgeschwindigkeits-Laserbearbeitung Moderation: Udo Löschner
10:40 - 11:00 Haus 5	Kaffeepause, Firmenausstellung
11:00 - 12:20 5-120	Session 1: Hochgeschwindigkeits-Laserbearbeitung Moderation: Udo Löschner
12:20 - 14:20 Haus 5	Mittagsimbiss, Firmenausstellung, Posterausstellung
14:20 - 16:00 5-120	Session 2: Ultrakurzpulslaserbearbeitung Moderation: Alexander Horn
14:20 - 16:00 5-119	Session 3: Lasertechnik und Sonderverfahren Moderation: Richard Börner
16:00 - 16:20 Haus 5	Kaffeepause, Firmenausstellung
16:30 - 18:00	Rundgang im Laserinstitut Hochschule Mittweida
18:00 -22:00	Netzwerkabend Laserinstitut Hochschule Mittweida

Session 1: Hochgeschwindigkeits-Laserbearbeitung
Moderation: Udo Löschner

10:20 - 10:40 **Hollow-core Fiber Beam Delivery of High-Power Ultrashort Pulses for Industrial Laser Applications**
Sebastian Eilzer, PT Photonic Tools

11:00 - 11:20 **Hocheffizientes Ultrakurzpuls-Laserabtragen mit langen GHz-Laserbursts**
Jörg Schille, Laserinstitut Hochschule Mittweida

11:20 - 11:40 **Hochdynamische Laserstrukturierung und -funktionalisierung von Werkzeugoberflächen mittels Polygonscankopf und DLIP**
Christian Mikley, ACSYS Lasertechnik GmbH

11:40 - 12:00 **Ablation von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen mit ultrakurzen Burst-Pulsen**
Philipp Rebentrost, Laserinstitut Hochschule Mittweida

12:00 - 12:20 **Active Fiber Loop (AFL) in femtosecond laser FemtoLux 30 – Innovations in Material Micromachining**
Deividas Andriukaitis, Ekspla

Session 2: Ultrakurzpulslaserbearbeitung
Moderation: Alexander Horn

14:20 - 14:40 **Laserbasierte Mikroumformung von Borosilikatglas: neue Möglichkeiten der Ultrakurzpulslaserbearbeitung**
Marina Skiba, Ernst-Abbe-Hochschule Jena

14:40 - 15:00 **Abtragung verschiedener Materialien mit sub-100 fs-Pulsen**
Kilian Fritsch, ^{2}n2-Photonics GmbH

15:00 - 15:20 **UKP-Fügen von transparenten Kunststoffen**
Robert Schmidt, Ernst-Abbe-Hochschule Jena

15:20 - 15:40 **Irreversible Materialveränderungen von einkristallinem Silizium nach Bestrahlung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung**
Andy Engel, Laserinstitut Hochschule Mittweida

15:40 - 16:00 **Exposition von Röntgenstrahlung bei der Materialbearbeitung unter Schutzgas in UKP-Laseranlagen**
Günter Dittmar, Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. G. Dittmar

Session 3: Lasertechnik und Sonderverfahren
Moderation: Richard Börner

14:20 - 14:40 **Klebstofffreies Fügen von Papier durch laserbasierte Materialmodifikation**
Florian Lull, Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik

14:40 - 15:00 **Wer bremst verliert - Feinstaub, wie können wir das verhindern?**
Peter Leipe, SITEC Industrietechnologie GmbH

15:00 - 15:20 **SpreeTec neXt - Neue Fertigungstechnologien für Komponenten und Systeme der dezentralen Energietechnik**
Tim Sahm, Fraunhofer IWS

15:20 - 15:40 **Einfluss von Laserparametern auf die Bildung Ohmscher Kontakte bei SiC-Bauelementen mittels Rückseiten-Annealing**
Maurice Clair, 3D-Micromac AG

15:40 - 16:00 **3D-Bearbeitung und Prozesskontrolle in der Direkten Laserinterferenzstrukturierung**
Christoph Zwahr, Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik

KEYNOTE-Vortrag

Markus Gräfe

Quantum imaging with undetected light – From fundamentals to holography with quantum light

Quantum imaging with undetected light – From fundamentals to holography with quantum light

Sebastian Töpfer, Sergio Tovar Perez, Jonas Vasikonis, Markus Gräfe
Institute for Applied Physics, Technical University of Darmstadt, Otto-Bernd-Str. 3, 64287 Darmstadt, Germany

By exploiting the quantum properties of light, new imaging modalities become possible. One prominent example is (quantum) imaging with undetected light, which allows for spectral separation of object illumination and detection. In doing so, the illuminating light remains undetected while the detected light can be tailored for optimal detection properties.

Exploiting nonclassical states of light allows new imaging and sensing approaches. In particular, nonlinear interferometers enable quantum imaging with undetected light [1]. Here, based on the effect of induced coherence [2], samples can be probed with light that is not detected at all. Instead, its quantum-correlated partner light is recorded and yields the information of the sample, although it never interacted with it. An experimental setup to perform such »spooky« quantum imaging with undetected light is depicted in Fig. 1 below. Photon pairs are generated via spontaneous parametric down-conversion in a nonlinear crystal (here, ppKTP). Three nonlinear interferometer arms are matched. While inserting an object into the idler arm (green), the image of the object is recorded on a camera with signal light (red) only. The talk will outline the fundamental concept, recent progress, limits, and perspectives for biomedical applications of nonlinear interferometers. A dedicated focus will be placed on implementing holography schemes that allow efficient extraction of amplitude and phase information of an object in an undetected light scheme [3,4,5].

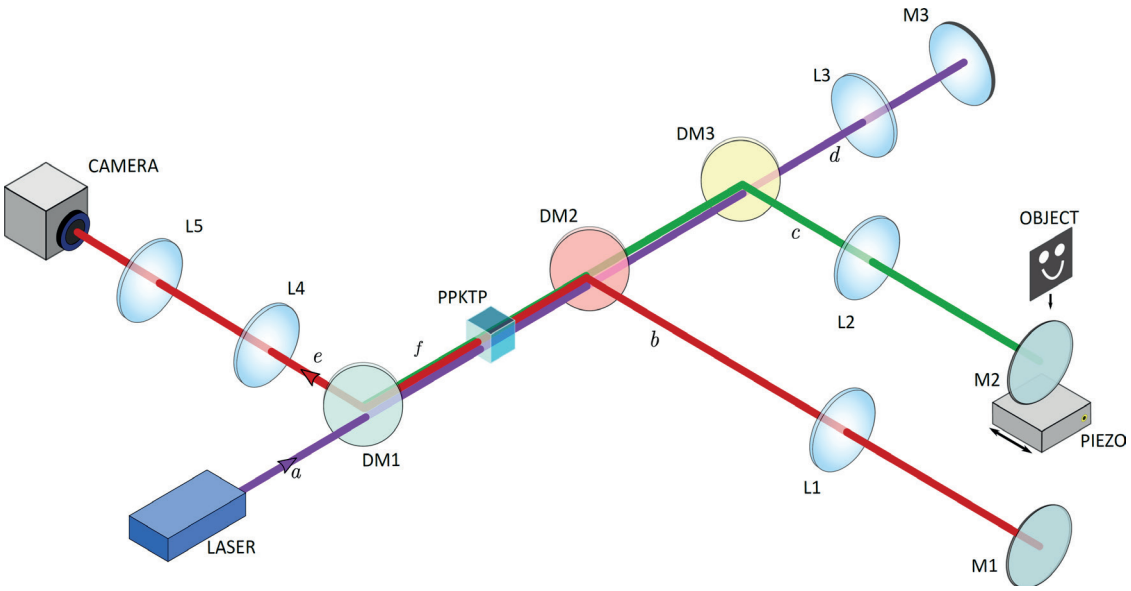


Figure 1. Experimental setup of a nonlinear interferometer for quantum imaging with undetected light.

References

[1] G. B. Lemos, V. Borish , G. D. Cole, S. Ramelow, R. Lapkiewicz, and A. Zeilinger, "Quantum imaging with undetected photons," Nature **512**, 409 (2014).

[2] X. Y.Zou, L. J. Wang, and L. Mandel, "Induced coherence and indistinguishability in optical interference, "Phys. Rev. Lett. **67**, 318 (1991).

[3] S. Töpfer, M. Gilaberte Basset, J. Fuenzalida, F. Steinlechner, J.P. Torres, and M. Gräfe, "Quantum holography with undetected light," Sci. Adv. **8**, eabl4301 (2022).

[4] J.R. León-Torres, F. Krajinić, M. Kumar, M. Gilaberte Basset, F. Setzpfandt, V.F. Gili, B. Jelenković, and M. Gräfe, "Off-axis holographic imaging with undetected light," Opt. Express **32**, 35449 (2024).

[5] S. Töpfer, S.A. Továr Perez, J.R. León Torres, J. Fuenzalida, and M. Gräfe, "Synthetic Quantum Holography With Undetected Light," arXiv:2410.17239 (2025).

SESSION 1

Hochgeschwindigkeits-Laserbearbeitung

Moderation: Udo Löschner

Hollow-core Fiber Beam Delivery of High-Power Ultrashort Pulses for Industrial Laser Applications

S. Eilzer, P. Froemel, A. Rudolf
PT Photonic Tools GmbH, Carl-Scheele-Str. 14, 12489 Berlin

Fiber-guided laser beam delivery is the preferred choice for laser applications whenever great flexibility is required and has become the industry standard for cw-lasers. By employing micro-structured hollow-core fibers, nonlinear effects and catastrophic damage that arise for ultrafast pulses in solid core fibers can be avoided. Several 100 µJ and hundreds of MW can be transmitted in quasi single mode fashion through these fibers. Continuous research on these fibers now allows for transmission at different wavelengths as well as with polarization maintaining properties. We present a modular fiber beam delivery system which can be flexibly integrated into existing applications. Micro-structured hollow-core fibers inside a sealed laser light cable efficiently guide ultrashort high-power laser pulses over distances of several tens of meters with excellent beam quality, while power and pulse duration are maintained. We report on the use in commercial environments, long-term tests and industrial applications. Effects on pulse duration, beam quality and efficiency as well as transmittable pulse energies and power handling will be discussed.

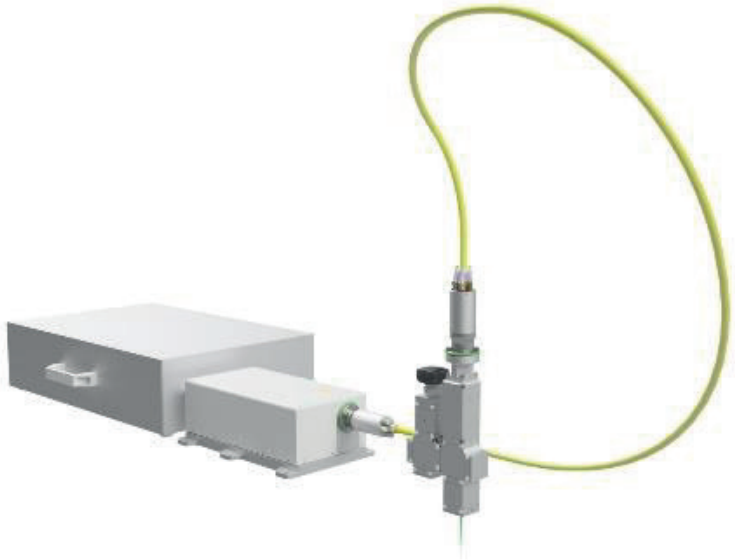


Figure 1: Modular fiber beam delivery system for ultrafast high-power laser applications.

Hocheffizientes Ultrakurzpuls-Laserabtragen mit langen GHz-Laserbursts

Jörg Schille[1], Stefan Mauersberger[1], Guillaume Bonamis[2], Eric Audouard[2], Sebastian Kraft[1], Clemens Hönninger[2], Udo Löschner[1]

1 Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Deutschland
2 Amplitude, 11 Avenue de Canteranne, 33600 Pessac, Frankreich

Seit einiger Zeit haben sich die Ultrakurzpulslaser (UKP-Laser) als ein faszinierendes Werkzeug in der Mikromaterialbearbeitung sowie zum Funktionalisieren von Oberflächen für neue Anwendungen in der Oberflächentechnik etabliert. Die begrenzte Produktivität, und als direkte Folge die nur gering zu erreichenden Durchsatzraten sind jedoch ein derzeitiger Engpass bei der Überführung der UKP-Lasertechnologie in reale technische Anwendungen. Eine praktikable Methode zur Steigerung der Abtragrate bei der UKP-Laserbearbeitung ist der Betrieb des Lasers im sogenannten Burst-Modus. Im Burst-Regime wird die Substratoberflächen mit Pulsfolgen bestehend aus Hunderten von ultrakurzen Teilpulsen bestrahlt. Jüngste Studien haben bereits gezeigt, dass sich die Abtrageffizienz bei der UKP-Laserbearbeitung insbesondere durch die Verwendung von langen Laser-Bursts mit Intraburst-Pulsfolgefrequenzen im GHz-Bereich erheblich steigern lässt [1].

In dieser Studie stellen wir das Hochgeschwindigkeits-Laserabtragen mit vergleichsweise langen GHz-Laserbursts bestehend aus bis zu 2600 ultrakurzen Intraburstpulsen vor. Dazu wurde erstmalig eine hybride UKP-Laserstrahlquelle mit einem ultraschnellen Polygonspiegel-Scansystem kombiniert. Zusätzlich kam ein schneller Galvanometerscanner zum Einsatz, so dass Laserstrahlablenkgeschwindigkeiten in einem weiten Bereich zwischen 2 m/s und 500 m/s für die Untersuchungen bereitstanden. Es zeigte sich, dass sich die Abtrageffizienz auf Edelstahl (AISI 304) bei der Verwendung von Laserbursts bestehend aus 1.300 Intraburst-Pulsen um den Faktor 2,8 im Vergleich zur Bestrahlung mit einzelnen UKP-Laserpulsen optimaler Fluenz erhöht. Die höchste Abtrageffizienz wurde dabei mit einer Scangeschwindigkeit von 10 m/s erreicht und nahm mit höheren Strahlgeschwindigkeiten stetig ab (Abbildung 1, links). In diesem Beitrag wird neben dem Einfluss der Intraburst-Pulszahl und der Scangeschwindigkeit auf den Materialabtrag und die Bearbeitungsqualität auch die Wirkung der Burst-Wiederholfrequenz und der mittleren Laserleistung diskutiert. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse mit dem Lasermaterialabtragen im Nanosekunden-Pulsbereich verglichen, um so das Verständnis über die beim UKP-Laserabtragen im Burstregime zugrunde liegenden Wechselwirkungsprozesse weiter aufzuklären und zu verstehen.

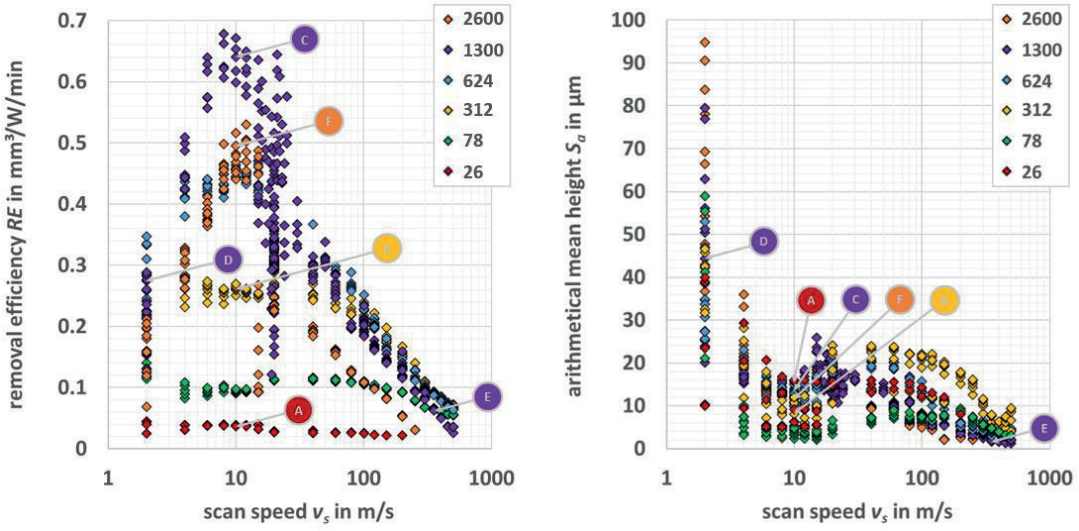


Abb. 1: Abtrageffizienz (links) und Oberflächenrauheit (rechts) beim UKP-Laserabtragen von rostfreiem Stahl mit langen Laserbursts und hoher Laserstrahlablenkgeschwindigkeit. Parameter der Laserbearbeitung: 95 W mittlere Laserleistung, 470 fs Pulsdauer, 200 kHz Burst-Wiederholfrequenz, 1,3 GHz Intraburst-Pulswiederholfrequenz, zwischen 26 und 2600 Intraburst-Laserpulse, zwischen 2 m/s und 500 m/s Scangeschwindigkeit. A-F zeigt Ergebnisse gleicher Bearbeitungsbedingungen an.

[1] E. Audouard and E. Mottay: High efficiency GHz laser processing with long bursts. Int. J. Extrem. Manuf. 5 (2023) 015003

Hochdynamische Laserstrukturierung und -funktionalisierung von Werkzeugoberflächen mittels Polygonscankopf und DLIP

Christian Mikley[1], Florian Rößler[2], André Streek[2,3], Tim Kunze[4]
ACSYS Lasertechnik GmbH, Leipziger Str. 37, 09648 Mittweida
MOEWE Optical Solutions GmbH, Leipziger Str. 27, 09648 Mittweida
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida
Fusion Bionic GmbH, Löbtauer Str. 69, 01159 Dresden

Die Gravur von Werkzeugen mittels ultrakurzgepulstem Laser konnte sich im vergangenen Jahrzehnt in der Industrie etablieren und löst zusehends konventionelle spanende Materialbearbeitung, Ätzprozesse aber auch Laserbearbeitung mit CW- und Nanosekundenlasern ab. Die hohen Abtragsraten bei sehr guter Oberflächenqualität sind Vorteile, die den vergleichsweise hohen Invest in die Strahlquelle und Anlagentechnik rechtfertigen. Dennoch sind großflächige Abträge und Oberflächenfunktionalisierungen auf Grund der limitierten Ablenkgeschwindigkeit der Bearbeitungsköpfe nach wie vor selten zu finden. In den im Rahmen der vom PTJ geförderten GRAVOmer Projekten HoLuMi-3D und HLH-Funk wurden die hochdynamische Ablenkung des Laserstrahles mittels Polygonscanner und die Multispotbearbeitung im DLIP-Verfahren zur Steigerung der Prozessgeschwindigkeit und Funktionalisierung der Materialoberfläche mittels UKP-Laser untersucht.

The engraving of tools using ultrashort pulsed lasers has become established in the industry over the past decade and is increasingly replacing conventional machining, etching processes and laser processing with CW and nanosecond lasers. The high ablation rates with very good surface quality are advantages that justify the comparatively high investment in the beam source and system technology. Nevertheless, large-area ablation and surface functionalization are still rare due to the limited deflection speed of the processing heads. In the GRAVOmer projects HoLuMi-3D and HLH-Funk funded by the PTJ, the highly dynamic deflection of the laser beam using polygon scanners and multi-spot processing using the DLIP method to increase the process speed and functionalization of the material surface using USP lasers were investigated.

Ablation von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen mit ultrakurzen Burst-Pulsen

Philipp Rebentrost, Daniel Metzner, Steffen Weißmantel
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Laserstrahlquellen mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung für den industriellen Einsatz verfügen über eine immer höhere mittlere Leistung. Diese möglichst effizient zu nutzen ist dabei entscheidend, um die bestmögliche Produktivität und in Verbindung damit einen hohen Durchsatz zu erreichen. Ein vielversprechender Ansatz ist die Nutzung von Bursts mit Intra-Burst-Raten im MHz- und GHz-Bereich, sowie deren Kombination in Form eines Bi-Bursts (GHz-Burst im MHz-Burst). Ein Wolframkarbid-Verbundwerkstoff wurde mit drei verschiedenen Burst-Modi bearbeitet, um die Prozesseffizienz, Produktivität und resultierende Oberflächentopographie in Abhängigkeit von der zeitlichen Energieverteilung und der Burst-Pulszahl zu untersuchen. Im Vergleich mit den Ergebnissen des Einzelpuls-Modus können signifikante Vorteile bei Produktivität und Qualität erreicht werden.

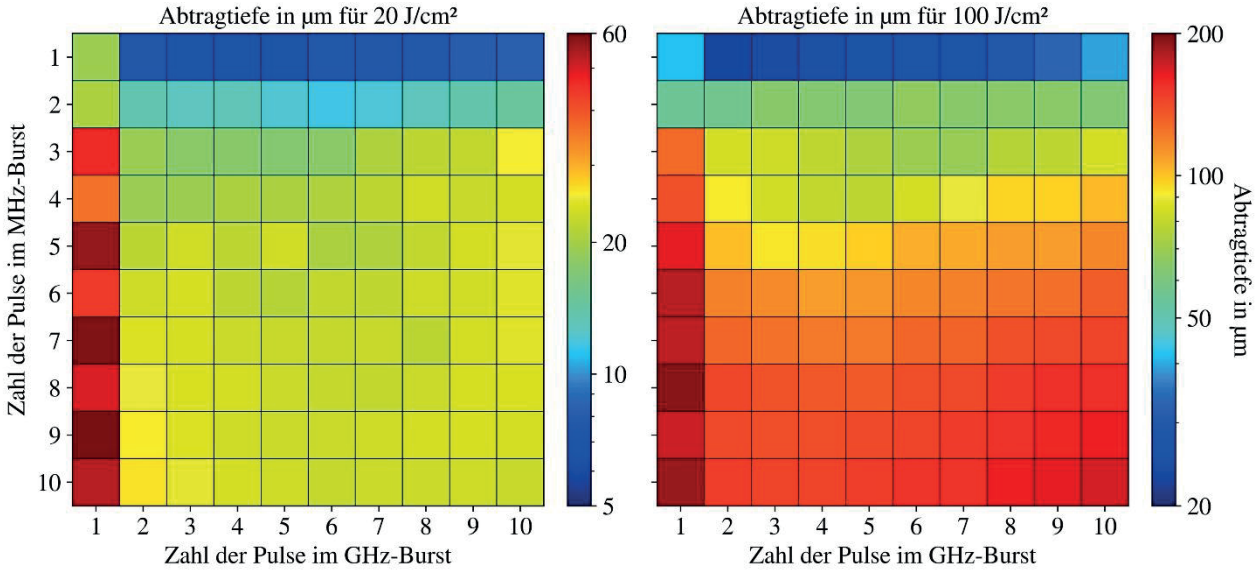


Abbildung 1: Abtragtiefe nach fünf Überfahrten auf WC-Co Verbundwerkstoff für Einzelpulse sowie den MHz-/ Ghz- und Bi-Burst bei unterschiedlichen Burstpulszahlen mit einer Gesamtfluenz von 20 J/cm² und 100 J/cm².

Active Fiber Loop (AFL) in femtosecond laser FemtoLux 30 – Innovations in Material Micromachining

Deividas Andriukaitis
Ekspla, Savanoriu Ave. 237, LT-02300 Vilnius, Lithuania

The femtosecond laser field is experiencing continuous innovations, leading to features like the Active Fiber Loop (AFL), which enables burst mode operation and wide pulse tunability. In this study, we delve into how AFL improves micromachining processes.

Femtosecond lasers have become vital tools in the material processing field due to their ultra-short pulse durations, which allow for the precise processing of a wide range of materials with minimal thermal effects. This capability results in superior material quality compared to conventional laser systems. The growing adoption of femtosecond lasers in industrial and scientific applications is driving innovations, leading to the development of advanced features such as the Active Fiber Loop (AFL) [1]. Integrating AFL technology into the industrial femtosecond laser FemtoLux 30 not only enables highly versatile MHz/GHz burst operating modes but also offers extensive tunability of pulse durations, ranging from femtoseconds to nanoseconds. This significantly broadens the laser system's application range [2]. Combined with industrial femtosecond laser FemtoLux 30, AFL technology not only enables versatile burst operation modes but also offers extensive pulse duration tunability, ranging from femtoseconds to nanoseconds, broadening the scope of applications [2]. This study explores AFL enabled operation modes, highlighting their advantages in micromachining processes.

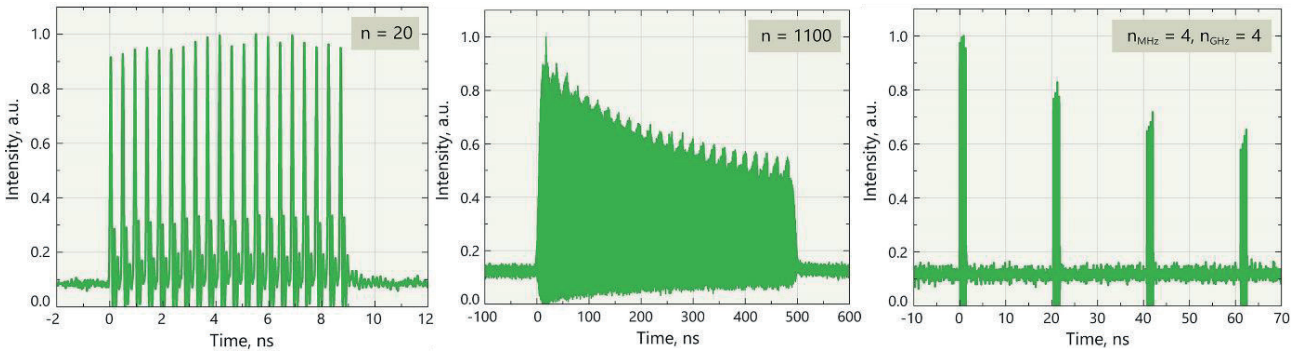


Fig. 1: AFL enabled FemtoLux 30 different GHz burst operation modes: (left) short GHz burst, (middle) long GHz burst, (right) combined MHz and GHz burst.

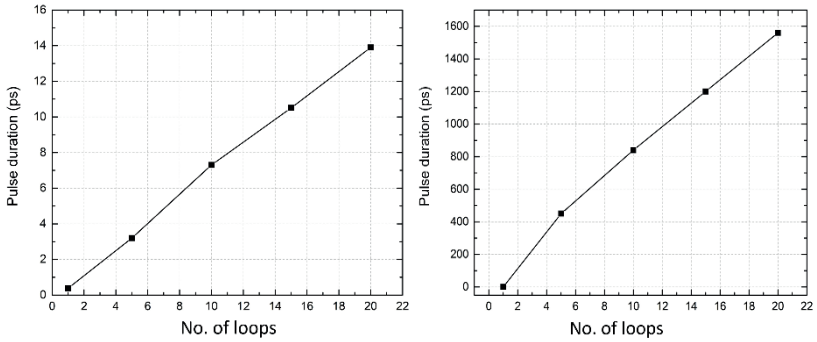


Fig. 2: Wide pulse duration tunability. Dependence of pulse duration on the number of round-trips inside the AFL.

[1] T. Bartulevičius, M. Lipnickas, V. Petrauskiene, *et al*., "30 W-average-power femtosecond NIR laser operating in a flexible GHz-burst-regime", Opt. Express, 36849-36862 (30), 2022.
[2] T. Bartulevičius, M. Lipnickas, K. Madeikis, *et al*., " Versatile ultrashort pulse laser tunable up to nanosecond range", Solid State Lasers XXXII: Technology and Devices, 1239904 (12399), 2023.

SESSION 2

Ultrakurzpulslaserbearbeitung

Moderation: Alexander Horn

Laserbasierte Mikroumformung von Borosilikatglas: neue Möglichkeiten der Ultrakurzpulslaserbearbeitung

Marina Skiba, Jens Bliedtner, Andrés Fabián Lasagni
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena
Technische Universität Dresden, George-Baehr-Str. 3c, 01069 Dresden

Der Einsatz hochenergetischer ultrakurzer Laserpulse (UKP) bietet vielfältige Möglichkeiten zur abtragsfreien Bearbeitung silikatischer Gläser. Die Materialmodifikationen reichen dabei von homogenen Brechzahländerungen über die Bildung von Nanogittern bis hin zur Erzeugung von Mikrohohlräumen. Wenig bekannt sind dagegen Verfahren zur gezielten Veränderung der Oberflächentopographie. Entscheidend für diese Art der Modifikation ist die zeitliche und räumliche Energieverteilung im Material. Dazu wird Glas mit einem Femtosekundenlaser im Scanning-Verfahren so bestrahlt, dass an der Ober- und Unterseite von Glasproben eine partielle Mikroumformung der Oberfläche stattfindet. Durch Variation von Laserparametern und Scanstrategien können Höhe und Form der erzeugten Strukturen gezielt beeinflusst werden. Das physikalisch-technische Verständnis dieses Prozesses kann Wege zu einem neuartigen Bearbeitungsverfahren aufzeigen.

Im Rahmen der Untersuchung wurde erstmals eine abtragsfreie, großflächige Oberflächenmodifikation von Glas mittels Ultrakurzpulsstrahlung realisiert.

Der verwendete Femtosekundenlaser (350 fs) mit einer Wellenlänge von 515 nm liefert Pulsenergien von ca. 10 µJ. Die Bearbeitung von Glasproben (Borofloat® 33, Fa. Schott) erfolgt im Scanning-Verfahren. Durch gezielte Einstellung der Scanstrategie (Puls- und Spurüberlappung, Fokuslage, Scanrichtung etc.) und der Laserleistung kann eine mikroskopische Veränderung der Oberflächentopographie gleichzeitig auf der Ober- und Unterseite der Glasproben erreicht werden. Die erzeugten Strukturen zeigen sich in Form von Mikrowölbungen, die je nach Laserparameter unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Die Profilhöhen variieren zwischen einigen hundert Nanometern und ca. 10 Mikrometern. Die Oberflächencharakterisierung erfolgt im Rahmen der Studie mit Hilfe der Weißlichtinterferometrie. Weitere Untersuchungsmethoden wie spannungsoptische Analyse, Raman-Spektroskopie, Thermographie, optische Kohärenztomographie, Wellenfrontmessung liefern wichtige Erkenntnisse zum physikalisch-technischen Prozessverständnis.

Die Arbeit eröffnet Perspektiven für neuartige laserbasierte Fertigungsverfahren und bietet Ansätze für weiterführende Untersuchungen zur gezielten abtragsfreien Oberflächenstrukturierung.

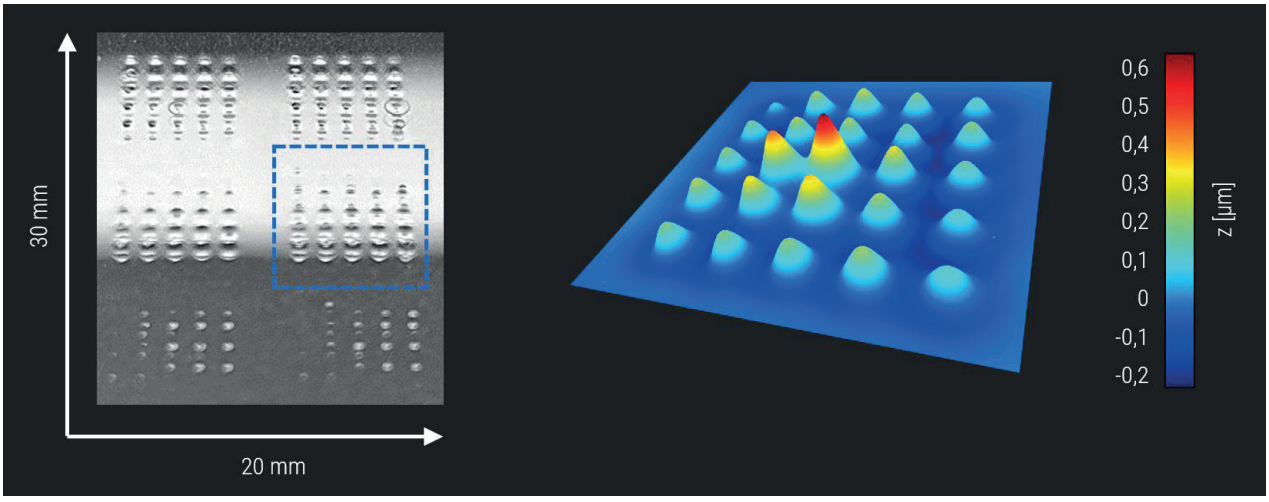


Abb. 1: Beispiel einer UKP-mikrostrukturierten Oberfläche. Aufnahme mit Fotokamera (li.) und Weißlichtinterferometer (re.).

Abtragung verschiedener Materialien mit sub-100 fs-Pulsen

Gregor Hehl[1], Kilian Fritsch[2], Rashad Esloughi[1], Cheriyan Varghese[1], Moinuddin Kadiwala[1], Oleg Pronin[1,2]

[1]Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, Deutschland
[2]n2-Photonics GmbH, Hamburg

Industrielle Femtosekundenlaser können durch externe Impulskompression Impulsdauern von unter 100 fs erreichen, was erstmals neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. In dieser Studie zeigen wir, dass sub-100-fs-Impulse beim Materialabtrag von Gläsern und anderen Materialien Vorteile wie reduzierte Abplatzungen, geringere Rauheit und materialspannungsfreien Abtrag bieten und auch für spezielle Anwendungen wie Glasmarkierung oder Mikrogitterherstellung geeignet sind.

Industrielle Femtosekundenlaser liefern Ausgangsimpulsdauern von 200 fs bis 1 ps. Durch externe Impulskompression in optisch nichtlinearen Multipasszellen können solche Laserimpulse hocheffizient (> 90 %) deutlich unter 100 fs komprimiert werden. Damit wird dieser Parameterbereich erstmals für viele Anwendungen verfügbar.

Wir untersuchen in diesem Beitrag den Abtrag verschiedener Materialien: Schott D262, BK7, Quarzglas, Gorilla-Glas, Zerodur, Saphir und Polyamid (Kapton) bei einer zentralen Wellenlänge von 1030 nm und einer Pulsdauer von bis zu 50 fs und vergleichen die Ablationsergebnisse qualitativ mit Impulsdauern im Bereich von 100 fs bis 2 ps.

Die Ergebnisse zeigen, dass sub-100-fs-Impulse und besonders 50-fs-Impulse, beim Abtrag von Gläsern, je nach Glasart und Abtragsmodus, einige Vorteile zeigen: reduzierte Abplatzungen (siehe Bilder unten), geringere Rauheit (40 %), praktisch materialspannungsfrei, ablagerungsfrei oder geringere hitzebeeinflusste Zonen. Darüber hinaus konnte bei Schott D263 (Abb. 1, links) und Zerodur-Glas (Abb. 1, rechts) unten ein transparenter Abtrag erreicht werden.

Außerdem konnten wir Mikrogitter bilden, die zu bunten Strukturen auf der Oberfläche von Glas und flexiblen Kapton führen. Diese können für die Glasmarkierung oder die Herstellung von Gittern von Interesse sein (Abb. 2)

Derzeit arbeiten wir an einem systematischen Vergleich der Ablation mit Strahlung der zweiten und vierten Harmonischen in Kombination mit <50 fs-Pulsen und erwarten, unsere ersten Ergebnisse für diese einzigartige Kombination aus grüner/UV-Wellenlänge und kurzer Pulsdauer auf der Konferenz präsentieren zu können.

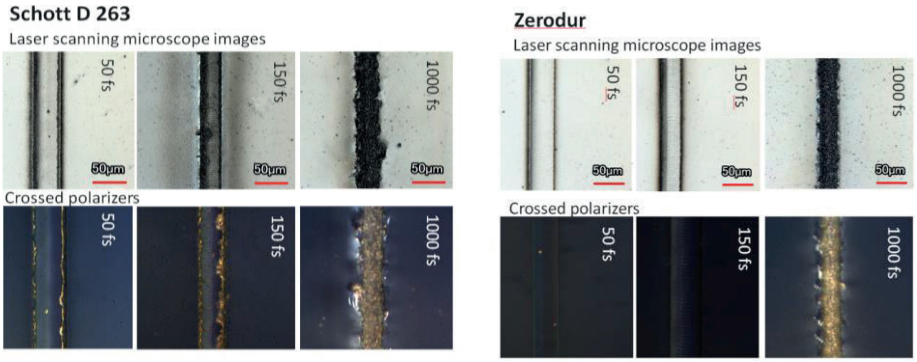


Abb. 1: Materialbearbeitungsergebnisse. Links: Schott D263, Rechts: Zerodur (rechts). Oben: Laserscanningmicroscope, unten: Visualisierung der Induzierten Doppelbrechung durch gekreuzte Polarisatoren.

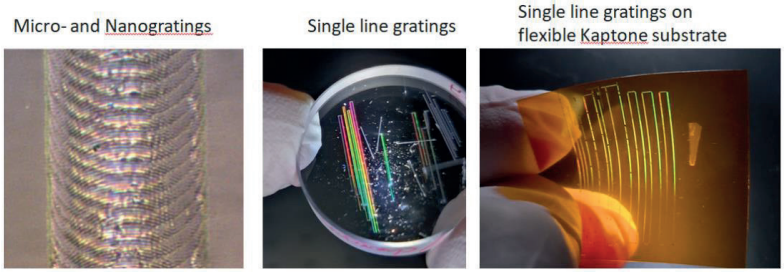


Abb. 2: Bearbeitungsergebnisse: Mikro & Nanogitter in Glas, Beugungsstruktur in Kapton

UKP-Fügen von transparenten Kunststoffen

Robert Schmidt, Jan Rücker
Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH (ifw Jena),
Ernst-Ruska-Ring 3, 07745 Jena

Am ifw Jena wird der Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Überlappschweißen transparenter Kunststoffe ohne den Zusatz absorbierender Additive untersucht. Dazu wurden Laserparameter wie die Wellenlänge, Repetitionsrate, Fluenz und Vorschubgeschwindigkeit systematisch variiert. Es zeigt sich, dass verschiedene amorphe Thermoplaste (PMMA, PC, PVC, PS) erfolgreich verschweißt werden können. Je nach verwendetem Polymer lassen sich eine vielversprechende optische Güte und Festigkeit erzielen.

Ifw Jena is investigating the use of ultrashort pulsed laser for overlap welding transparent polymers without the addition of absorbent additives. Therefore, laser parameters such as wavelength, repetition rate, fluence and scanning speed were systematically adjusted. The results show that various polymers (PMMA, PC, PVC, PS) can be successfully welded. Depending on the polymer, promising optical quality and strength can be achieved.

Kunststoffe sind vielseitige Materialien mit einem breiten Anwendungsspektrum. Gängige Verarbeitungsverfahren wie das Spritzgießen stoßen jedoch bei der Herstellung komplexer und filigraner Strukturen an ihre Grenzen. Um solche Geometrien dennoch zu erzeugen, werden diese oft aus einfacheren Elementen zusammengeschweißt [1]. Herkömmliche Laserverfahren bringen jedoch Wärme und Spannungen in das Material ein oder erfordern den Einsatz von Additiven zur Verbesserung der Absorption [2].

Diese Arbeit zielte darauf ab, ein UKP-Laser-basiertes Verfahren (λ = 515 + 1030 nm, τ = 0,95 ps) zum Überlappschweißen transparenter Kunststoffe zu entwickeln. Hierbei durchdringt der Laserstrahl den oberen Fügepartner und wird auf den Kontaktbereich fokussiert. Nichtlineare Absorptionsmechanismen ermöglichen eine lokale Aufschmelzung innerhalb des Materialvolumens, gleichzeitig werden thermische Einflüsse an der Oberfläche minimiert. Während der UKP-Schweißprozess bei Glaswerkstoffen bereits umfassend untersucht wurde, liegen für transparente Kunststoffe bislang nur wenige Erkenntnisse vor [3, 4].

Es wurde untersucht, wie sich die verschiedenen Laserparameter wie Wellenlänge, Repetitionsrate, Fluenz und Vorschubgeschwindigkeit auf die Bildung von Schmelze auswirken. Um die industrielle Anwendbarkeit des Verfahrens zu erleichtern, kamen Fokussieroptiken mit langen Brennweiten (63 mm + 100 mm) zum Einsatz. Es wurden Fügeversuche an transparenten Kunststoffen (PMMA, PC, PVC und PS) sowohl in homogener als auch heterogener Anordnung durchgeführt. Die mechanische Stabilität der Verbindungen wurde mittels Zug-Scherversuchen bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen untersuchten Kunststoffen homogene Verschweißungen hergestellt werden können. Für PMMA wurden nahezu vollständig transparente Verbindungen erzielt, während PC, PVC und PS zur Karbonisierung neigen. Die höchste Festigkeit wurde bei PS gemessen, gefolgt von PC, PMMA und PVC. Auch hybride Kombinationen konnten unter bestimmten Voraussetzungen erfolgreich verschweißt werden.

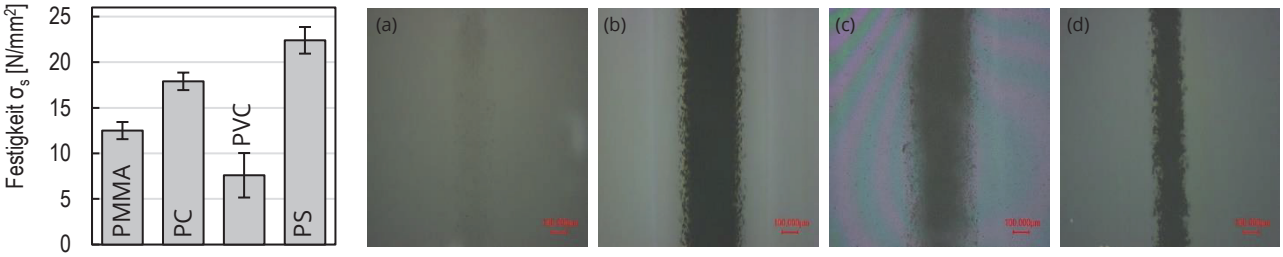


Abb. 1: Hergestellte Überlappverschweißungen. Links: Zug-Scherfestigkeit der Verbindungen, Rechts: Mikroskopische Aufnahme der Schweißnähte für (a) PMMA, (b) PC, (c) PVC und (d) PS.

[1] Troughton, M. J.: Handbook of plastics joining: a practical guide; William Andrew; 2008
[2] Woosman, N. M.; Frieder, L. P.: Clearweld: welding of clear, coloured, or opaque thermoplastics; Proc. of Inst. of Mech. Eng., Part D: Journal of Automobile Engineering 219 (2005) 9; 1069–1074.
[3] Roth, G.-L.; Rung, S.; Hellmann, R.: Welding of transparent polymers using femtosecond laser; Appl. Phys. A 122 (2016) 2; 1–4.
[4] Cvecek, K.; Dehmel, S.; Miyamoto, I.; Schmidt, M.: A review on glass welding by ultra-short laser pulses; Int. J. Extrem. Manuf. 1 (2019) 4; 42001.

Irreversible Materialveränderungen von einkristallinem Silizium nach Bestrahlung mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

Andy Engel, Markus Olbrich, Theo Pflug und Alexander Horn
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

In diesem Beitrag wird die Bestrahlung von einkristallinem, <111> -orientiertem Silizium in Abhängigkeit von der Fluenz der eingesetzten ultrakurz gepulsten Laserstrahlung (Pulsdauer 40 fs, Zentralwellenlänge 800 nm) und der Anzahl der Einzelpulse pro Bearbeitungsstelle untersucht. Die aus der Laserstrahlung-Materie-Wechselwirkung resultierenden irreversiblen Materialveränderungen werden vorgestellt und diskutiert. Diese Materialveränderungen wurden durch die Messung des orts- und spektralaufgelösten Brechungsindexes mittels ex-situ Ellipsometrie und REM-Analysen detektiert. Vergleichende Analysen der Topografie der bestrahlten Oberflächen wurden mittels konfokaler Laser-Scanning-Mikrokopie und Rasterkraftmikroskopie durchgeführt. Zusätzliche Informationen über die Tiefe der thermisch bedingten Materialveränderungen konnten durch nachgelagertes nasschemisches Ätzen gewonnen werden. Ergänzt wurden die ex-situ Analysen durch ultraschnelle Messtechnik, pump-probe-imaging Reflektometrie und Interferometrie sowie durch optische Modellierung und Simulationen der Laser-Materie-Wechselwirkung. Dieser komplementäre Ansatz ermöglicht eine genauere Beschreibung der physikalischen Prozesse, die durch ultrakurz gepulste Laserstrahlung ausgelöst werden, angefangen von Änderungen der Kristallinität bis hin zur Ablation.

In this study the irradiation of single-crystalline, <111> -oriented silicon is investigated by varying the fluence of the applied ultrashort pulsed laser radiation (pulse duration 40 fs, central wavelength 800 nm) and the number of single pulses per spot. The resulting irreversible material changes due to the laser radiation-matter interaction are presented and discussed. These material changes were observed by measuring the spatial- and spectral-resolved refractive index using ex-situ ellipsometry and SEM analyses. Comparative analyses of the topography of the irradiated surfaces were performed using confocal laser scanning microscopy and atomic force microscopy. Additional information about the depth of the thermally induced material phase changes have been obtained by downstream wet chemical etching. The ex-situ analyses were supported by ultrafast metrology, pump-probe imaging reflectometry and interferometry as well as optical modeling and simulations of the laser-matter interaction. This complementary approach enables a more accurate description of the physical processes induced by ultrashort pulsed laser irradiation, starting from changes in crystallinity up to ablation.

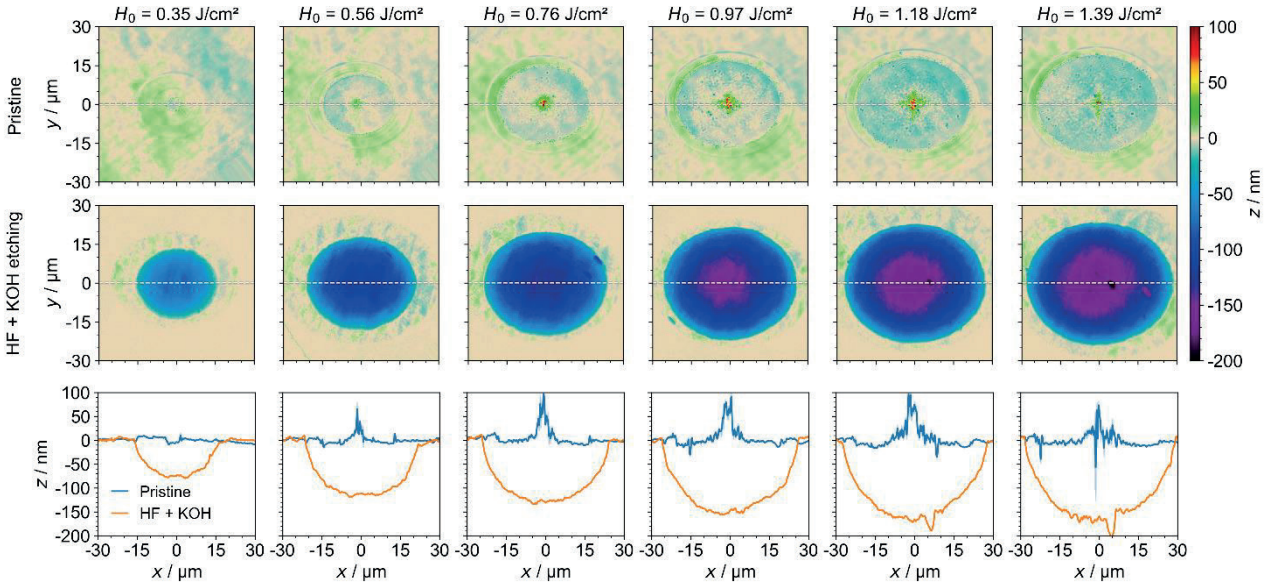


Abb. 1: Irreversible Materialveränderungen infolge der angewandten ultrakurz gepulsten Laserstrahlung für die Einzelpuls-Bestrahlung (obere Reihe: Topografie nach der Einzelpuls-Bestrahlung; mittlere Reihe: Topografie nach dem nasschemischen Ätzen; untere Reihe: vergleichender Profilschnitt in der Mitte der Abtragstrukturen vor und nach dem nasschemischen Ätzen).

Exposition von Röntgenstrahlung bei der Materialbearbeitung unter Schutzgas in UKP-Laseranlagen

Günter Dittmar

Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. Günter Dittmar, 73433 Aalen

Bei der Materialbearbeitung in UKP-Laseranlagen unter Schutz- und Reaktionsgasen ist die Emission von Röntgenstrahlung neu zu bewerten. Unbekannte Wechselwirkungen zwischen dem gepulsten Laserstrahl, dem Werkstoff und dem Gas können zu höheren Dosisleistungen bei der Röntgenstrahlung führen als es bei der Materialbearbeiten unter Luft bisher bekannt war. Sorgfältige Messungen der drei gesetzlich geforderten Dosisleistungen für die Haut, die Augen und den Körper sind weiterhin notwendig. Die Schutzumhausung der UKP-Laseranlage muss für den kritischsten Betrieb ausgelegt sein.

When processing materials in USP laser systems under protective and reaction gases, the emission of X-rays must be reassessed. Unknown interactions between the pulsed laser beam, the material and the gas can lead to higher dose rates for X-rays than was previously known for material processing in air. Careful measurements of the three legally required dose rates for the skin, eyes and body are still necessary. The protective housing of the USP laser system must be designed for the most critical operation.

Abb. 1: Spektrodosimeter SILIX

SESSION 3

Lasertechnik und Sonderverfahren

Moderation: Richard Börner

Klebstofffreies Fügen von Papier durch laserbasierte Materialmodifikation

Florian Lull[1], Volker Franke[1], Fabian Kayatz[2], Mathias Kott[2], Grethel Iturralde[2], Robert Protz[3], Andre Lehmann[3], Christer-Clifford Schenke[4], Stephan Kronenberger[4]

[1] Fraunhofer IWS, Winterbergstraße 28, 01069 Dresden

[2] Fraunhofer IVV, Heidelberger Str. 20, 01189 Dresden

[3] Fraunhofer IAP, Geiselbergstraße 69, 14476 Potsdam

[4] Fraunhofer IWU, Nöthnitzer Straße 44 01187 Dresden

Die vorliegende Arbeit stellt einen neuartigen, laserbasierten Prozess zum fremdstofffreien Fügen von Papier vor. Mittels CO-Laserstrahlung wird Papier unter kontrollierten Bedingungen in schmelzbare Reaktionsprodukte zersetzt. Diese können anschließend in einem klassischen Heißsiegelprozess zum Fügen verwendet werden. Ziel dieser Arbeit war die Weiterentwicklung der grundlegenden Technologie zu einem industrienahen Bandprozess.

Ziel der Untersuchungen war es einen laserbasierten, zusatzstofffreien Fügeprozess für Cellulose-basierte Werkstoffe, wie Papier und Pappe, zu entwickeln. Bisherige Untersuchungen zeigten, dass sich Papier bei Bestrahlung mit Kohlenstoffmonoxid-Laserstrahlung (CO-Laserstrahlung) schnell in flüssige und gasförmige Reaktionsprodukte umwandelt. Die wiedererstarrten Reaktionsprodukte weisen, im Gegensatz zu Cellulose selbst, eine Schmelztemperatur unterhalb der Zersetzungstemperatur auf. Somit lassen sie sich mittels eines klassischen Heißsiegelverfahrens durch Druck und Wärme wieder verflüssigen und können so zum Fügen ohne materialfremde Klebstoffe verwendet werden.

Im aktuellen Projekt wird das grundlegende Verfahren im Hinblick auf eine Erhöhung der Fügenahtfestigkeit und einer Verwendung industrieüblicher Papiere weiterentwickelt. Dabei wurden unteranderem verschiedene Laserparameter und Papiermaterialien variiert und der Einfluss auf das Fügeergebnis und die chemische Stoffumwandlung analysiert. Es konnten Verbindungen realisiert werden, deren Festigkeit höher war als die des Papiermaterials selbst.

Die Erkenntnisse werden in die Umsetzung des Verfahrens in einer Demonstratoranlage im vorindustriellen Maßstab eingebracht, mit dem Ziel Produktverpackungen in großen Stückzahlen herzustellen. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist dabei die Wasserlöslichkeit des papiereigenen Klebstoffes, welche die Recyclingfähigkeit des Papiers nicht beeinträchtigen.

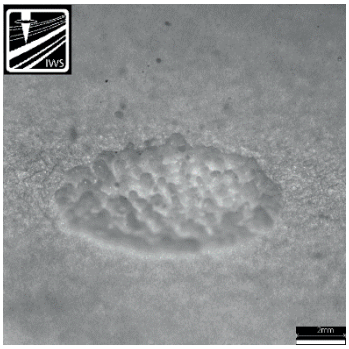


Abb. 1: Flüssiger Zwischenzustand während der Bestrahlung.

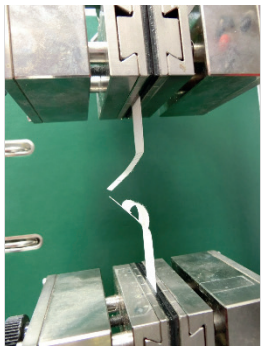


Abb. 2: Gefügtes Papier im Zugversuch mit Versagen im Papier.

Wer bremst verliert – Feinstaub, wie können wir das verhindern?

Peter Leipe
SITEC Industrietechnologie GmbH, Bornaer Straße 192, 09114 Chemnitz

Die EURO 7 Abgasnorm, die voraussichtlich 2025 in Kraft treten soll, wird striktere Anforderungen an die Emissionen von Fahrzeugen stellen. In diesem Zusammenhang rückt auch die Feinstaubbelastung durch Abrieb beim Bremsvorgang in den Fokus der Hersteller. Die Hartstoffbeschichtung von Bremsscheiben ist dabei ein effektiver Weg, um die Gesamtleistung des Bremssystems zu verbessern, die Haltbarkeit zu erhöhen und gleichzeitig die Feinstaubemissionen zu reduzieren.
Hierbei spielt der Laser mit dem Laserpulverauftragsschweißen seine ganze Stärke aus, da mit diesem Verfahren unterschiedlichste Beschichtungsaufgaben verzugsarm und effizient gelöst werden können. Um in Zukunft die hohen Bedarfe an beschichteten Bremsscheiben bereitzustellen, hat SITEC prozesssichere und bedarfsgerechte Produktionslösungen für nahezu alle Typen und Größen von Bremsscheiben entwickelt.

Abb.1: Beschichtung von Bremsscheiben

SpreeTec neXt - Neue Fertigungstechnologien für Komponenten und Systeme der dezentralen Energietechnik

Tim Sahm[1], Dirk Dittrich[1], Christoph Wilsnack[1]
Fraunhofer IWS, Winterbergstraße 28, Dresden[1]

Unter den Gesichtspunkten der Energie- und Ressourceneffizienz sowie der ansteigenden Komplexität und Variantenvielfalt von Hochtechnologieprodukten kommt den additiven/generativen Verarbeitungsverfahren (AM) eine zukunftsweisende Bedeutung zu. Eine kosteneffiziente Fertigung bei hoher geometrischer und werkstofflicher Variabilität sind Ziel hybrider Bauweisen. Dafür forscht das Fraunhofer IWS im Projekt „SpreeTec neXt“ zur hybriden Fertigung (AM + Halbzeug) unter der Nutzung von Lasertechnologien. Grundlage dafür ist die Betrachtung des Einflusses verschiedener Fügekonfigurationen (AM-Lagenorientierung, Spannungsarmglühen) und Schweißparameter auf die mechanischen Eigenschaften solcher Verbindungen. Im Fokus stehen dabei die metallografische Untersuchung und Zugversuche von lasergeschweißten 316L Edelstahlhybridproben (LPBF + Halbzeug). Hieraus sollen Erkenntnisse über das Eigenschaftspotential solcher Verbindungen für die Fertigung hybrider Großbauteile gewonnen werden. Gleichzeitig steht die Auslegung in Hinsicht auf Belastbarkeit und Absicherung der Anwendbarkeit im Blickfeld.

The ever-increasing complexity and variety of high-tech products as well as the focus on energy and ressource efficient systems go hand in hand with a growing demand on additive manufactured parts. They facilitate a cost effective production combining high scalability and part variability. Fraunhofer IWS is investigating laser-based hybrid manufacturing technologies (combination of additive + semi-finished) as part of the project „SpreeTec neXt“. One fundamental part is the investigation of the influence of part configuration (AM layer orientation, stress relief heat treatment) and laser welding parameters on the mechanical properties of hybrid parts. The focus in this investigation is on metallographic characterization and tensile testing of laser beam welded hybrid 316L (LPBF + semi-finished) samples. These results reveal the potential of tailored part properties for manufacturing of large-scale hybrid components. Additionally, information about design criteria for safe application can be gained.

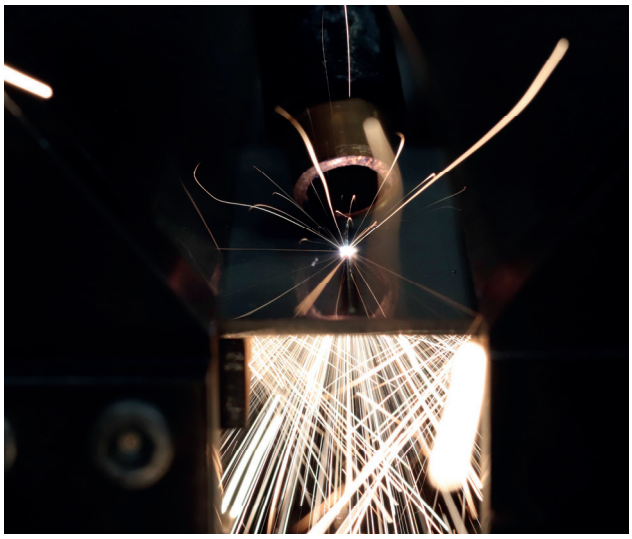


Abb. 1: Schweißprozess unter Nutzung hochfrequenter Strahloszillation

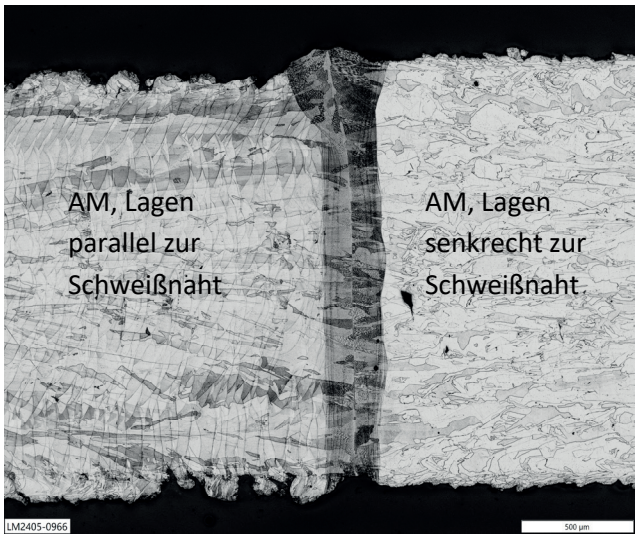


Abb. 2: AM – AM Verbindung im Querschliff, 316L

Einfluss von Laserparametern auf die Bildung Ohmscher Kontakte bei SiC-Bauelementen mittels Rückseiten-Annealing

Maurice Clair
3D-Micromac AG, Technologie-Campus 8, 09128 Chemnitz

Der Vortrag behandelt die ohmsche Kontaktbildung in Halbleiterbauelementen und konzentriert sich dabei auf die Herausforderungen dünner SiC-Substrate. Die Studie untersuchte die Auswirkung verschiedener Laserparameter auf die Erzeugung von Ni_xSi_y-Schichten auf 4H-SiC-Wafern unter Verwendung von zwei diodengepumpten Festkörperlaserquellen mit unterschiedlichen Pulsdauern und Strahlformen. Die Ergebnisse zeigen die hohe Toleranz der elektrischen Eigenschaften gegenüber hohen Laserfluenzen, eine Korrelation zwischen Laserenergiedichte und Ni_xSi_y-Schichtdicke sowie den Einfluss der Pulsüberlappung auf die Bildung kohlenstoffreicher Schichten an der SiC-Ni_xSi_y-Grenzfläche.

The presentation discusses Ohmic Contact Formation in semiconductor devices, focusing on its challenges and rapid thermal processing use for thick SiC substrates. The study investigated the effect of various laser parameters on creating Ni_xSi_y layers on 4H-SiC wafers using two diode-pumped solid-state laser sources with different pulse durations and beam shapes. The findings reveal the high tolerance of electrical performance to high laser fluencies, a correlation between laser energy density and Ni_xSi_y layer thickness, and the impact of pulse overlap on the formation of carbon-rich layers at the SiC-Ni_xSi_y interface.

Die Ohmsche Kontaktformation (OCF) ist ein entscheidender, jedoch komplexer Prozess bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen. Bei SiC-Bauelementen stellt die Bildung des ohmschen Kontakts aufgrund der Materialeigenschaften eine besondere Herausforderung dar. Während Rapid Thermal Processing (RTP) für dicke SiC-Substrate etabliert ist, erfordert die Reduktion der Substratdicke den Einsatz von Laser-basierten Wärmebehandlungen.

In dieser Studie wurden die Auswirkungen verschiedener Laserparameter auf die Bildung von Ni_xSi_y-Schichten untersucht. Versuche erfolgten auf 350 µm dicken 4H-SiC-Wafern, die mit einer 70 nm NiAl-Schicht bedeckt waren. Zwei diodengepumpte Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 355 nm und unterschiedlichen Pulsdauern (Laser A: ca. 30 ns, Laser B: ca. 80 ns) wurden mit zwei Strahlformen (Gaussian und Flat-Top) eingesetzt. Parameter-Sweeps von Laserleistung und Spot-Überlappung wurden durchgeführt.

Die Analysen umfassten Oberflächen- und Schichtwiderstandsmessungen, Röntgenfluoreszenzspektroskopie, Röntgendiffraktometrie, Rauigkeitsmessungen sowie Rasterelektronenmikroskopie (REM) der präparierten Querschnitte. Besonders hervorzuheben sind Ergebnisse für Laser B mit Flat-Top-Strahlform (Abbildung 1). Diese zeigen eine hohe Toleranz der elektrischen Leistung gegenüber hohen Laser-Fluenzwerten sowie eine Korrelation zwischen Energiedichte und Ni_xSi_y-Schichtdicke. Geringe Spot-Überlappungen (<30 %) erwiesen sich als optimal zur Minimierung kohlenstoffreicher Zwischenschichten an der Grenzfläche zwischen SiC und Ni_xSi_y.

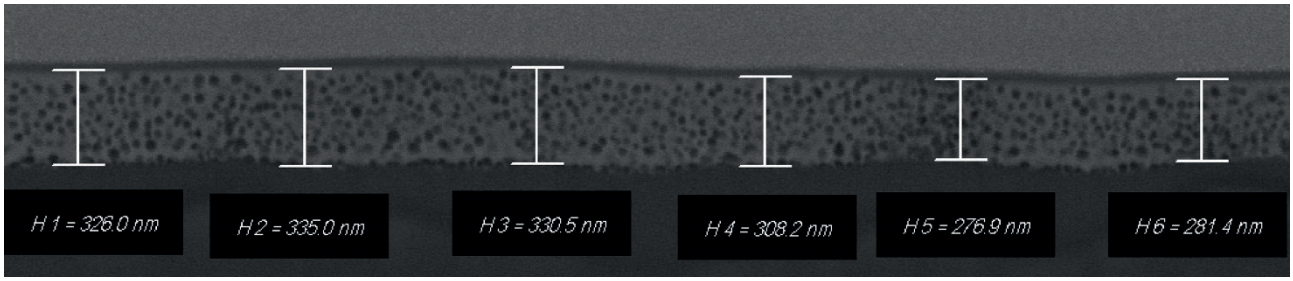


Abb. 1: SEM-Bild eines Ni_xSi_y -Übergangs erzeugt mit Laser B, Flat-Top, Overlap 20 %, 5.5 J/cm², 0.55 Ohm/sq

3D-Bearbeitung und Prozesskontrolle in der Direkten Laserinterferenzstrukturierung

Christoph Zwahr, Frederic Schell, Tobias Steege
Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS , Winterbergstraße 28, 01129 Dresden

Das Direkte LaserInterferenzstrukturieren (DLIP) hat sich als effizientes Verfahren zur Erzeugung präziser Mikrostrukturen etabliert, die natürliche Oberflächen nachbilden und funktionalisierte Oberflächen auf technischen Materialien erzeugen. Bei der Fertigung komplex geformter Bauteile, wie Spritzgusswerkzeugen oder Hüftimplantaten, erfordert der Prozess den Einsatz von 4- oder 5-Achsen-CNC-Maschinen. Diese Arbeit stellt neue Ansätze vor, um DLIP-Strukturen auf komplexen Bauteilen zu erstellen, einschließlich einer Maschinenplattform mit simultaner Positionierung und einem DLIP-Modul für ein homogenes Interferenzvolumen. Zusätzlich wird die Prozessüberwachung und -steuerung mit akustischen Emissionen demonstriert, wobei die Laser-Ausgangsleistung angepasst wird, um eine gleichmäßige Oberfläche zu erzielen.

Direct Laser Interference Patterning (DLIP) has become an efficient method for producing precise microstructures that mimic natural surfaces and create functionalized coatings on technical materials. For the manufacturing of complex-shaped components such as injection molds or hip implants, the process requires the use of 4- or 5-axis CNC machines. This work presents new approaches for creating DLIP structures on complex components, including a machine platform with simultaneous positioning and a DLIP module for a homogeneous interference volume. Additionally, process monitoring and control using acoustic emissions are demonstrated, where laser output power is adjusted to achieve a uniform surface.

Das Direkte Laserinterferenzstrukturieren (engl. kurz - DLIP) hat sich als vielseitiges Werkzeug zur Herstellung von gut definierten Mikrostrukturen etabliert, die natürliche Oberflächen nachahmen und das Ziel haben, funktionalisierte Oberflächen auf relevanten technischen Materialien zu erhalten. Bei der Fertigung von Bauteilen mit komplexen Formen, wie z. B. Spritzgusswerkzeugen oder Hüftimplantaten, ist jedoch eine 4- bzw. 5-Achsen-CNC-Maschine erforderlich, um die Texturierung vorzunehmen. Darüber hinaus erfordert die Fertigung von DLIP-Strukturen auf komplex geformten Bauteilen Überwachungsstrategien, um die Wiederholbarkeit sowie die Qualitätskontrolle der erzeugten Strukturen zu gewährleisten.

In dieser Arbeit werden neue Ansätze vorgestellt, um DLIP Strukturen auf komplex geformten Bauteilen zu erzeugen. Unter anderem wurde eine Maschinenplattform eingesetzt, die simultane Positionierung mit Translational- und Rotationsachsen ermöglicht und mit einem DLIP-Modul ausgestattet ist, das ein homogenes Interferenzvolumen ermöglicht. Die Programmierung des Werkzeugpfades erfolgt mithilfe einer Software zur computergestützten Fertigung (CAM). Die Qualität der Strukturen sowie die erzielbaren Fertigungsgeschwindigkeiten werden analysiert.

Zudem wird die Überwachung und Steuerung des DLIP Prozesses durch eine akustische Prozessüberwachung am Beispiel einer Laserquelle mit schwankender Ausgangsleistung demonstriert, die inhomogene Oberflächenmuster erzeugt. Durch die Überwachung der akustischen Emissionen mit einem MEMS-Mikrofon, das Frequenzen bis zu 192 kHz aufzeichnet, wurden 2D-Heatmaps der Ausgangsspannungsamplitude über die strukturierte Fläche erzeugt. Dabei zeigt sich, dass das akustische Prozesssignal sehr gut mit der makroskopisch sichtbaren lokalen Verfärbung der Oberfläche korreliert. Dies wird anhand von Konfokalmikroskopaufnahmen belegt, die mit dem akustischen Signal (R^2 = 0,98) korreliert wurden. Mit einem PI-Regler wurde die Laser-Ausgangsleistung basierend auf dem akustischen Signal während des Prozesses angepasst, wodurch eine homogene Oberfläche erzielt werden kann.

Abb. 1: DLIP strukturierter 3-dimensionaler Flügeldemonstrator mit superhydrophober Oberfläche.

Programm - 14. Mittweidaer Lasertagung

Mittwoch, 19.06.2025 – Programmüberblick

9:00 - 9:40 5-120	Keynote-Vortrag: **Kleine Partikel, große Wirkung. Wie lasergenerierte Nanopartikel den 3D-Druck veredeln** Anna Rosa Ziefuss, Technische Chemie 1 und Zentrum für Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE), Universität Duisburg- Essen
9:40 - 10:00 5-120	Session 4: Additive Fertigung Moderation: André Streek
10:00 - 10:20 Haus 5	Kaffeepause, Firmenausstellung
10:20 - 11:20 5-120	Session 4: Additive Fertigung Moderation: André Streek
11:20-13:00 Haus 5	Mittagsimbiss, Firmenausstellung, Posterausstellung
13:00 - 14:00 5-120	Session 5: Laseroberflächentechnik Moderation: Steffen Weißmantel
13:00 - 14:00 5-119	Session 6: Lasermesstechnik Moderation: Silvio Fuchs
14:00 - 14:20 Haus 5	Kaffeepause, Firmenausstellung
14:20 - 15:00 5-120	Abschlussvortag und Staffelstabübergabe

Session 4: Additive Fertigung
Moderation: André Streek

09:40 - 10:00 **Investigating the Impact of Femtosecond Laser Parameters on the Microstructure in Additive Manufacturing of 8YSZ**
Markus Kühn, Ernst-Abbe-Hochschule Jena

10:20 - 10:40 **Untersuchungen zum selektiven Laserstrahlschmelzen von Aluminiumoxid für die direkte Herstellung oxidkeramischer Bauteile**
Laura Römer, Laserinstitut Hochschule Mittweida

10:40 - 11:00 **Entwicklung einer Pilotanlage für das laserbasierte Pulverbettschmelzen von Glas**
Anne-Marie Layher, Ernst-Abbe-Hochschule Jena

11:00 - 11:20 **Makro-SLM: Materialien, Anwendungsbeispiele und Herausforderungen**
Martin Erler, Laserinstitut Hochschule Mittweida

Session 5: Laseroberflächentechnik
Moderation: Steffen Weißmantel

13:00 - 13:20 **Erzeugung von spannungsfreien Schichten aus kubischem Bornitrid (c-BN) mittels Laserpulsabscheidung (PLD) und Laserpuls-Entspannung**
Falko Jahn, Laserinstitut Hochschule Mittweida

13:20 - 13:40 **Combining laser processing with atmospheric pressure plasma jet etching**
Robert Heinke, IOM Leipzig, TU Dresden

13:40 - 14:00 **Stoßwellenbasierte Oberflächenreinigung von Insektenrückständen mittels CO2 Laser**
Anika Langebeck, BIAS - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH

Session 6: Lasermesstechnik
Moderation: Silvio Fuchs

13:00 - 13:20 **Inline-Hochgeschwindigkeits-Infrarotmessung zur Prozesskontrolle bei der Bearbeitung von Diffusionsmedien für Brennstoffzellen mittels Ultrakurzpulslaser**
Alexander Kaiser, Hochschule Aalen

13:20 - 13:40 **Optische Inspektion komplexer Strukturen auf Basis physikalisch interpretierbarer neuronaler Netze**
Peter Hartmann, Fraunhofer IWS

13:40 - 14:00 **Rekonstruktion der Ablationsdynamik einer dünnen Goldschicht**
Markus Olbrich, Laserinstitut Hochschule Mittweida

Abschlussvortrag

14:20 - 14:50 **Ultraschnelle optische Messtechniken für die Lasermaterialbearbeitung**
Alexander Horn, Laserinstitut Hochschule Mittweida

14:50 - 15:00 **Verabschiedung und Staffelstabübergabe**

KEYNOTE-Vortrag

Anna Rosa Ziefuss

Kleine Partikel, große Wirkung. Wie lasergenerierte Nanopartikel den 3D-Druck veredeln

Kleine Partikel, große Wirkung. Wie lasergenerierte Nanopartikel den 3D-Druck veredeln.

Anna R. Ziefuß, Stephan Barcikowski
Technische Chemie 1 und Zentrum für Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE), Universität Duisburg-Essen, Universitätsstraße 7, 45141 Essen, Deutschland

Die additive Fertigung (AM) steht vor zahlreichen Herausforderungen, insbesondere bei der Materialauswahl und der Prozesskontrolle. Laser-generierte Nanopartikel (NP) bieten hier innovative Ansätze, um den Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB)-Prozess zu optimieren und das Anwendungsspektrum zu erweitern. Dieser Vortrag beleuchtet die gesamte Prozesskette, von der Untersuchung der Dynamik bei der Herstellung von Nanopartikeln mittels Pump-Probe-Analyse während der Laser-Fragmentierung in Flüssigkeiten (LFL), über die Modifikation von Pulvern, bis hin zur In-situ-Prozessüberwachung mittels optischer Emissionsspektroskopie (OES) während der Verarbeitung. Anhand konkreter Beispiele, wie dem Einsatz von NIR-absorbierenden Nanopartikeln (NP) zur Verbesserung des Polymerdrucks und der Modifikation von Permanentmagneten im Rahmen des SFB/TRR 270 „HOMMAGE", wird verdeutlicht, wie Nanopartikel den Übergang zu neuen Anwendungen und verbesserten Prozessen in der additiven Fertigung ermöglichen können.

Die additive Fertigung (AM) hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Dennoch stoßen viele bestehende Prozesse, insbesondere beim PBF-LB, an ihre Grenzen. Viele der aktuell verfügbaren Pulver wurden ursprünglich für andere Anwendungen konzipiert und können ihr Potenzial im Laser PBF-LB-Prozess nicht optimal entfalten. Daher ist eine Modifikation dieser pulverförmigen Ausgangsmaterialien erforderlich, um die Anforderungen dieses speziellen Verfahrens zu erfüllen. NP bieten hier eine vielversprechende Lösung, da sie die Energieeinbringung verbessern und das Materialverhalten (wie das Erstarrungs- und Kristallisationsverhalten) beim 3D-Druck gezielt beeinflussen können. Wichtig ist dabei, dass die NP eine hohe Reinheit aufweisen, um keine unerwünschten Störfaktoren in den Prozess einzubringen. Gleichzeitig müssen industrielle Anforderungen wie hohe Produktivität und Effizienz berücksichtigt werden, was ein fundiertes Prozessverständnis erfordert. Ein zentraler Engpass liegt in der Materialqualität und der Prozesskontrolle.

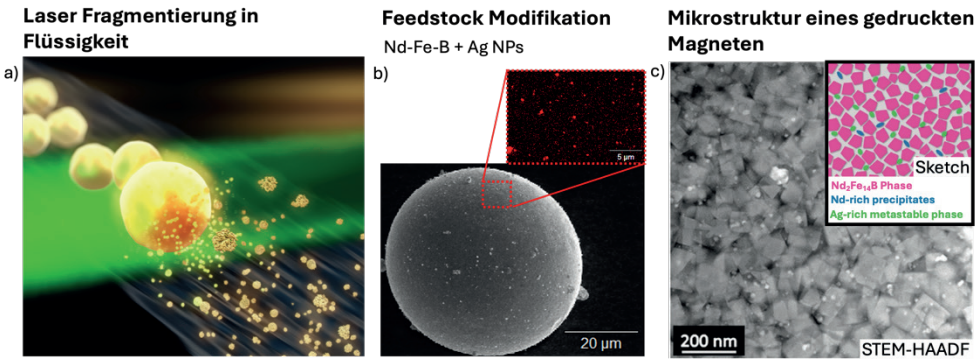


Abb. 1: Abbildung 1: a) Herstellung von Nanopartikeln durch Laserfragmentierung, b) REM-Aufnahme eines kommerziell erhältlichen Nd-Fe-B-Mikropartikels, das mit lasergenerierten, Liganden freien Silber-Nanopartikeln oberflächenmodifiziert wurde, c) STEM-HAADF-Aufnahme und schematische Darstellung der Mikrostruktur eines mittels Ag NP-modifiziertem Pulver gedruckten Nd-Fe-B Magneten.

Um dieses Prozessverständnis zu erweitern, werden Pump-Probe-Methoden eingesetzt, um die Dynamik während der LFL mit hoher Zeitauflösung zu untersuchen. Dieses tiefere Verständnis des Syntheseprozesses erlaubt es, gezielte Anpassungen vorzunehmen und NP mit spezifischen Eigenschaften zu entwickeln, die anschließend für die Modifikation der Mikropulver für die Additive Fertigung genutzt werden. Im Vortrag demonstrierte Beispiele sind NIR-absorbierende NP, die den Energieeintrag beim Polymerdruck verbessern und Alterungsprozesse reduzieren, sowie Ag NP, die die mechanischen und magnetischen Eigenschaften von Permanentmagneten beeinflussen. Die weitere Prozesskette knüpft an dieser Materialvorbereitung an. Eine wichtige Erweiterung der Prozesskette ist die In-situ-Prozessüberwachung. Mittels OES können chemische und physikalische Parameter während des PBF-LB-Prozesses „live" erfasst werden. Dies ermöglicht nicht nur eine bessere Qualitätskontrolle, sondern schafft die Grundlage für eine zukünftige Prozesssteuerung in Echtzeit. Der Vortrag zeigt, wie diese Entwicklungsbausteine – von der Untersuchung der Nanopartikeldynamik über die Pulver-Modifikation bis hin zur Prozessüberwachung – zusammengeführt werden können, um die additive Fertigung auf das nächste Level zu heben. Ziel ist es, nicht nur bestehende Herausforderungen zu adressieren, sondern auch neue Anwendungen wie den Desktop-Druck mit verbesserten Materialien oder die Produktion komplexer Magnetbauteile zu ermöglichen.

SESSION 4

Additive Fertigung

Moderation: André Streek

Investigating the Impact of Femtosecond Laser Parameters on the Microstructure in Additive Manufacturing of 8YSZ

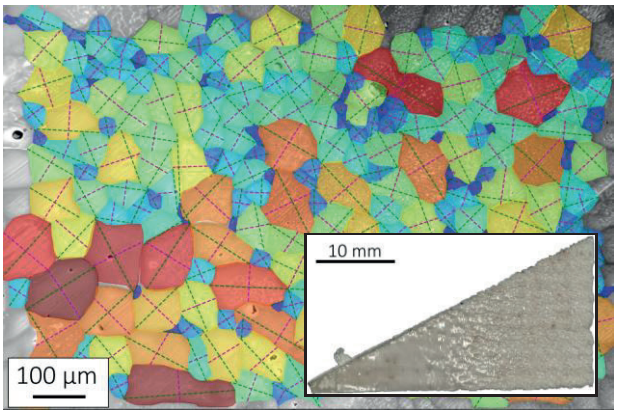
Markus Kühn[1], Sarah Kaden[1], Jens Bliedtner[1], Patrick Hähle[2], Daniel Störzner[2]

[1]Ernst Abbe Hochschule, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena
[2]LCP Laser Cut Processing GmbH, Heinrich-Hertz-Straße 16, 07629 Hermsdorf

This study investigates the application of femtosecond lasers in the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) process, focusing on their potential for advancing additive manufacturing techniques. The precise control of laser parameters, including scanning speed, power, repetition rate, and focus, is shown to significantly influence the processing dynamics and quality of fabricated layers and microstructure. Finite-difference simulations provide insights into the thermal behavior induced by the femtosecond laser, emphasizing its capability to manage temperature gradients effectively. The findings highlight the suitability of femtosecond lasers for producing precise 8YSZ layers, laying the groundwork for innovative additive manufacturing processes. This approach prepares the way for hybrid additive-subtractive manufacturing, enabling enhanced design flexibility and material performance.

Die Studie legt den Grundstein für hybride Fertigungsansätze, bei denen additive und subtraktive Verfahren kombiniert werden können, um hochpräzise und komplexe Geometrien zu realisieren. In den Experimenten wird der Einsatz eines Femtosekundenlasers (τ = 220 fs; E_P = 200 µJ) im Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Prozess untersucht, um dessen Potenzial für die additive Fertigung von yttriumstabilisiertem Zirkonoxid (8YSZ) zu bewerten. Ziel ist es, die Auswirkungen von Laserparametern wie Scangeschwindigkeit, Laserleistung, Pulswiederholrate und Fokuslage auf die Schmelz- und Gefügeausprägung zu analysieren. Dabei werden verschiedene Prozessfenster untersucht, um Schichten zu erzeugen, die als Grundlage für komplexe Bauteile in der additiven Fertigung dienen.

Die Untersuchungen ergeben, dass sich die Korngrößenfraktionen mit sich ändernden Parametern an die Fraktionsgröße der Pulverpartikel des Ausgangsmateriales annähern oder entfernen, was die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz des Femtosekundenlasers trotz der sehr kurzen Puls-Wechselwirkungszeit von 220 fs für das LPBF-Verfahren geeignet ist. Dieser ermöglicht durch die lokale Kumulation der Wärmemenge und die reduzierte Wärmeeinflusszone eine präzise Steuerung der Mikrostruktur und Oberflächenqualität. Die Experimente werden durch Simulationen mittels der Finite-Differenzen-Methode ergänzt, die Temperaturgradienten im Schmelzbad modellieren, um die Auswirkungen der Parameter auf die Gefügeausprägung zu analysieren. Zukünftige Arbeiten sollen sich auf die Optimierung von Mehrschichtprozessen und den Einsatz von Vorwärmtechniken konzentrieren, um die Stabilität durch optimierte Gefügebaumechanismen weiter zu verbessern.



Dreieckige Testgeometrie erweist sich als günstig, da das Temperaturverhalten abh. von der Länge der Scanlinien untersucht werden kann; 8YSZ Gefügestruktur mit fs-Laser hergestellt

Untersuchungen zum selektiven Laserstrahlschmelzen von Aluminiumoxid für die direkte Herstellung oxidkeramischer Bauteile

Laura Römer, Adrian Forkert, Martin Erler, André Streek
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Technische Keramiken zeichnen sich durch herausragende mechanische, thermische und chemische Eigenschaften aus und finden daher in zahlreichen Industriebereichen, darunter die Automobilindustrie, Elektroindustrie und Medizintechnik, breite Anwendung. Mit der steigenden Nachfrage nach komplexen keramischen Bauteilen, deren Herstellung mit konventionellen Fertigungsverfahren zunehmend an technologische Grenzen stößt, rückt die additive Fertigung in den Fokus der Forschung. Zum derzeitigen Stand existieren mehrere additive Fertigungsverfahren, welche die Herstellung keramischer Bauteile mit hoher Designfreiheit ermöglichen. Die meisten dieser Verfahren, wie beispielsweise das Binder Jetting oder die Stereolithografie, erfordern jedoch einen zeitaufwendigen mehrstufigen Prozess mit nachgelagerter Sinterung zur Erzielung der gewünschten mechanischen Bauteileigenschaften. Das selektive Laserstrahlschmelzen (SLM) ermöglicht durch vollständiges Aufschmelzen des Ausgangsmaterials prinzipiell die direkte Herstellung keramischer Bauteile in einem einstufigen Prozess. Eine große Herausforderung stellen dabei im Prozess auftretende hohe Temperaturgradienten dar, welche zur Rissbildung und somit zur Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften der Bauteile führen. Ansätze zur Rissvermeidung aus der Literatur sind beispielsweise das starke Vorheizen des Materials, welches mit einer kostenintensiven Anlagentechnik einhergeht, oder die Verwendung eutektischer Stoffgemische zur Senkung der Schmelztemperatur. Insbesondere Untersuchungen zur Herstellung von Bauteilen aus reinem Aluminiumoxid (Al_2O_3) mittels SLM sind bisher begrenzt und stellen deshalb den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar.

Die Prozessentwicklung für die Herstellung von Al_2O_3-Bauteilen erfolgte mit dem Ziel, eine möglichst hohe Bauteildichte zu erreichen. Neben der Verwendung von CO_2-Laserstrahlung wurde auch der Einsatz eines 1064 nm-Faserlasers untersucht, um eine potenziell höhere Auflösung zu erzielen. Der Einfluss des Energieeintrages, sowie verschiedener Scanstrategien auf die Rissbildung wurde analysiert. Durch gezielte Optimierung der Prozessparameter gelang erfolgreich die Herstellung komplexer Bauteile aus Aluminiumoxid.

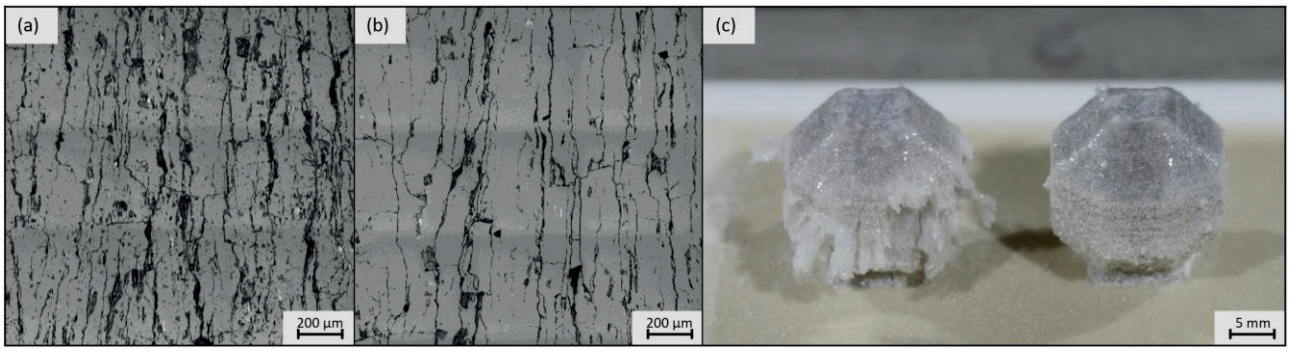


Abb. 1: Einfluss der Volumenenergiedichte auf die Rissbildung (E_V = 167 J/mm³ (a), E_V = 333 J/mm³ (b)) und Vermeidung von Spannungsrissen durch optimierte Prozessparameter (c).

Entwicklung einer Pilotanlage für das laserbasierte Pulverbett-schmelzen von Glas

Anne-Marie Layher[1*], Felix Thumann[1], Thekla Boeckh[1], Lisa Tewes[1], J. Peter Schirmer[2], Johannes Rösler[2], Jens Bliedtner[1]

[1]Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

[2]Rösler CeramInno GmbH, Langenauer Straße 2, 96355 Tettau/Schauberg

*Anne-Marie.Layher@eah-jena.de

Der Einsatz von Glasmaterialien in der additiven Fertigung, wird gegenwärtig international erforscht und entwickelt. [1] Insbesondere das laserbasierte Pulverbettschmelzen, auch als „selektives Laserstrahlsintern (SLS)“, „selektives Laserstrahlschmelzen (SLM®)“ oder „Laser Powder Bed Fusion (LPBF)“ bekannt, wird derzeitig grundlegend im Labormaßstab erforscht.

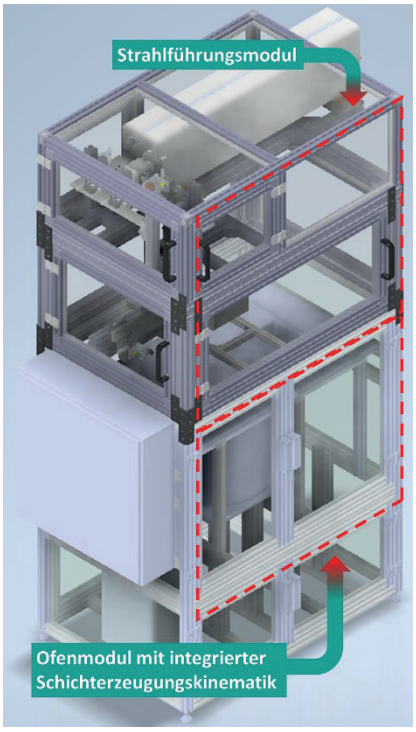


Abbildung 1: Konzept der Pilotanlage

Für die Verwendung von hochschmelzenden Gläsern (Quarzglas) wird eine prozessspezifische additive Anlagen-technik benötigt, welche derzeitig kommerziell nicht verfügbar ist. Im Labormaßstab konnte nachgewiesen wer-den, dass u.a. eine homogene laterale und vertikale Pulverbetterwärmung die erzeugbare Bauteilqualität essentiell beeinflusst [2, 3]. Diese prozessbedingten Temperatureinflüsse auf die Maschinen- und damit auch Produktionsgenauigkeit wurde bisher nicht erforscht.

Ziel ist die Entwicklung und industrielle Umsetzung einer Pilotanlage, mit welcher eine robuste und ausfallsichere Produktion von dreidimensionalen Glasbauteilen erreicht werden kann. Schwerpunkte sind bspw. die Entwicklung des Isolationskonzeptes zum Schutz der temperaturempfindlichen Optiken des Strahlengangs, aber auch die Betrachtung zur Langzeitstabilität der Pulvermaterialien.

Des Weiteren wird das laserbasierte Pulverbettschmelzen bzgl. erreichbarer Bauteilqualitäten sowie der Generierung von definierten Porenverläufen in vertikaler und radialer Bauteilrichtung weiterentwickelt. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen ist die erreichbare Reproduzierbarkeit unter Produktionsbedingungen, um die Prozessqualität quantitativ beschreiben und iterativ verbessern zu können. In Abbildung 1 ist die konzeptionelle Ausgestaltung der Pilotanlage dargestellt. Diese besteht aus einem Strahlführungs- und einem Ofenmodul. Die modulare Trennung ermöglicht nachweislich den Betrieb im Hochtemperaturbereich ($T \leq 1000°C$), ohne Schäden an den temperaturempfindlichen Komponenten des Strahlenganges zu riskieren. Messungen während des Betriebes, ergaben lediglich geringfügige Temperaturänderungen an den Optiken von $\Delta T < 10$ K. Weiterhin ist die Anlage hinsichtlich der Baumaterialien so konzipiert, dass auch nach mehrmaliger Verwendung sowie Recyclingmaßnahmen, das verwendete Pulver keine messbaren Kontaminationen aufweist. Mit der Pilotanlage ist es außerdem gelungen, Glasbauteile mit definierter Porosität sowie gradierten Porenverläufe zu reproduzierbar zu fertigen.

Quellen

[1] Bliedtner, J.: “Optiktechnologie -Grundlagen, Verfahren, Anwendungen, Beispiele“ München: Carl Hanser Ver-lag, 2022. ISBN: 978-3-446-45850-5

[2] A.-M. Layher; T. Boeckh; L. Tewes; F. Thumann; J. Bliedtner; J. Dellith; R. Müller; E. Rädlein: DVS-Berichte, 384, 157-166

[3] Kasch, S., et al.: „Solution Approaches and Process Concepts for Powder Bed-Based Melting of Glass” in Springer Nature Proceedings of AMPA2020, Schweiz, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-54334-1

GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Bildung und Forschung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ mit dem Kennzeichen „02P21K531“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Makro-SLM:
Materialien, Anwendungsbeispiele und Herausforderungen

Martin Erler, Sebastian Weinhold, Andreas Kotsch, Michael Pfeifer, André Streek
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Makro-SLM ist ein innovatives additives Fertigungsverfahren, das durch die Synergie von Multi-kW-Laserleistung (Einzelstrahl) und Pulverbett die Vorteile des selektiven Laserschmelzens (SLM/LPBF) mit denen der direkten Energieabscheidung (z.B. WAAM, LBAM) kombiniert. Dadurch ermöglicht das Verfahren hohe Aufbauraten von bis zu 10 kg/h bei gleichzeitig maximaler Designfreiheit. Zudem können die Produktionskosten im Vergleich zu herkömmlichen SLM-Verfahren um bis zu 90 % reduziert werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Herstellung großvolumiger, hochkomplexer Metallbauteile im Kubikmeterbereich und stellt eine wirtschaftliche Alternative zu traditionellen Metallguss- und Fräsverfahren dar.

Aktuelle Untersuchungen zur Druckbarkeit verschiedener Stahlwerkstoffe, einschließlich Analysen zur Dichte und zu den mechanischen Eigenschaften der hergestellten Bauteile werden vorgestellt. Zudem werden praxisnahe Anwendungsbeispiele präsentiert, die das Potenzial des Makro-SLM für den 3D-Druck großer Metallkomponenten veranschaulichen. Abschließend werden die zentralen Herausforderungen dieses Verfahrens diskutiert und Lösungsansätze aufgezeigt, um die Prozessstabilität, Materialqualität und Wirtschaftlichkeit weiter zu optimieren.

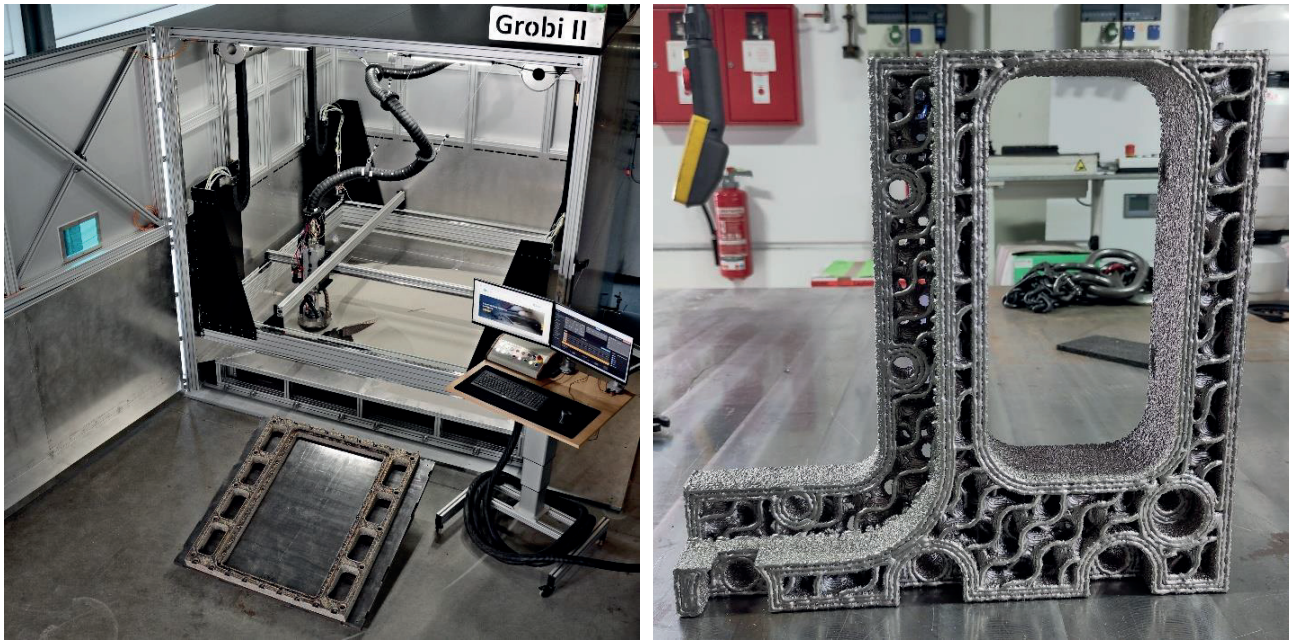


Abb. 1: Entwicklungen zum Makro-SLM-Verfahren. Links: Prototypenanlage mit einem Bauraum von 2 x 2 x 1 m³ und max. 8 kW Laserleistung. Vor der Anlage ist das erste großvolumige Bauteil zu sehen, das damit 3D-gedruckt wurde. Es handelt sich um einen innovativen Leichtbaurahmen für die Betonsteinproduktion mit einer 30 % Gyroid-Füllung zur Gewichtsreduzierung (Grundfläche: 1,3 x 1,2 m², Höhe: 78 mm, Masse: 120 kg, Druckzeit: 43 Stunden). Rechts: Teilstück des Rahmens mit Einblick in die innere Füllstruktur (Nachbearbeitung durch Kugelstrahlen).

SESSION 5

Laseroberflächentechnik

Moderation: Steffen Weißmantel

Erzeugung von spannungsfreien Schichten aus kubischem Bornitrid (c-BN) mittels Laserpulsabscheidung (PLD) und Laserpuls-Entspannung

Falko Jahn, Steffen Weißmantel
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Die kubische Phase von Bornitrid (c-BN) gehört aufgrund ihrer bemerkenswerten mechanischen und chemischen Eigenschaften zu den Schichtmaterialien mit dem größten Potential für Verschleißschutzanwendungen. Die spannungsfreie Abscheidung konnte jedoch trotz intensiver Forschung bislang nicht erfolgreich realisiert werden. Wir präsentieren nun eine Methode, mit der durch alternierende Anwendung der Laserpulsabscheidung unter Ionenbeschuss und indirekter Laserpuls-Entspannung die nahezu spannungsfreie Erzeugung von dünnen c-BN-Subschichten möglich wird. So können sowohl sukzessiv dicke c-BN-Schichten bis wenige µm Schichtdicke als auch Wechselschichtsysteme aus c-BN und h-BN (hexagonale Phase) realisiert werden.

The cubic phase of boron nitride (c-BN) is one of the coating materials with the greatest potential for wear protection applications due to its remarkable mechanical and chemical properties. However, stress-free deposition has not yet been successfully realized despite extensive research. We now present a method that enables the nearly stress-free generation of thin c-BN sublayers through the alternating application of ion beam assisted pulsed laser deposition and indirect laser pulse relaxation. This allows for both the successive deposition of thick c-BN layers up to a few micrometers and the realization of alternating layer systems made of c-BN and h-BN (hexagonal phase of boron nitride).

Aufgrund seiner herausragenden mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften wird Bornitrid bereits seit Jahrzehnten als Beschichtungsmaterial erforscht. Insbesondere die kubische Phase (c-BN) als zweithärtestes bisher bekanntes Material mit hoher thermischer und chemischer Beständigkeit hat den Wunsch befeuert, dieses Material für industrielle Anwendungen nutzbar zu machen. Unter allen untersuchten Beschichtungstechnologien konnte nur die Laserpulsabscheidung (PLD) Aufwachsraten von mehreren 10 nm/min erreichen, hoch genug für industrielle Bedürfnisse [1]. Wie bei anderen Abscheidetechnologien auch, weisen mittels PLD erzeugte c-BN-Schichten sehr hohe intrinsische Druckspannungen auf, die die Schichtdicke auf wenige 100 nm begrenzen.

Wir stellen eine Methode vor, mit der dünne c-BN-Schichten erzeugt werden können, die praktisch keine Eigenspannungen mehr aufweisen. Diese Schichten werden mittels Ionengestützter Laserpulsabscheidung als Subschichten von 100 nm Schichtdicke auf Siliziumsubstraten abgeschieden. Durch Anwendung eines modifizierten Laserpuls-Entspannungsverfahrens [2] konnten wir die intrinsischen Druckspannungen in diesen Subschichten von 10 GPa auf weniger als 1 GPa reduzieren.

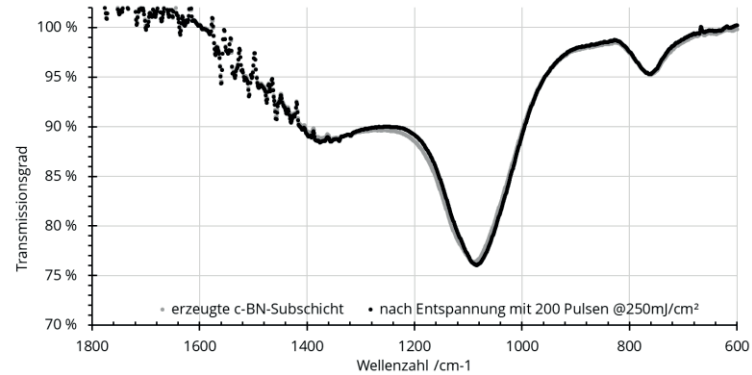


Abb. 1: Das IR-Spektrum zeigt: Die Laserpuls-Entspannung ändert nichts an der Modifikation der Schicht.

Abwechselnde Abscheidung und Entspannung solcher Subschichten ermöglichen es, sukzessiv Schichtdicken zu erreichen, wie sie für industrielle Anwendungen notwendig sind (z.B. Verschleißschutzschichten). Dabei können einerseits ausschließlich phasenreine c-BN-Subschichten zu anwendbaren c-BN-Beschichtungen gestapelt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination von c-BN-Subschichten mit harten h-BN-Subschichten zur Bildung von Wechselschichtsystemen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften. H-BN entspricht dabei der hexagonalen Modifikation von Bornitrid und erreicht bei Abscheidung mittels PLD variierbare Eindringhärten im Bereich von 15 GPa bis 25 GPa. Dadurch wird das Gesamtschichtsystem insgesamt superhart, was Eindringhärten von mehr als 40 GPa entspricht.

[1] S. Weissmantel, G. Reisse, Pulsed laser deposition of cubic boron nitride films at high growth rates, Diamond and Related Materials 10 (2001) 1973–1982. https://doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00386-7.

[2] S. Weissmantel, G. Reisse, D. Rost, Preparation of superhard amorphous carbon films with low internal stress, Surface and Coatings Technology 188-189 (2004) 268–273. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.070.

Combining laser processing with atmospheric pressure plasma jet etching

Robert Heinke[a,b], Martin Ehrhardt[a], Pierre Lorenz[a], Thomas Arnold[a,b], Klaus Zimmer[a]
[a)]Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig
[b)]Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden

Moderne optische Präzisionskomponenten wie Asphären und Freiformflächen erfordern hochentwickelte Fertigungstechniken. Das APPJ-Ätzen nutzt fluorhaltige Gase zur Materialabtragung unter Umgebungsbedingungen, stößt jedoch bei metalloxidhaltigen Materialien wie N-BK7 und Zerodur® auf Rückstandsprobleme, die die Oberflächenqualität beeinträchtigen. Eine Kombination aus Laserbearbeitung und Plasmajet-Ätzen kann Rückstände entfernen, die Rauheit reduzieren und die Prozessstabilität erhöhen. Diese Studie präsentiert Konzepte zur Integration beider Verfahren und deren Anwendung auf technisch relevante Materialien.

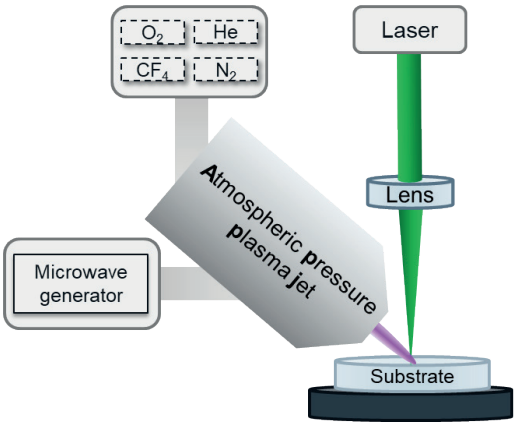
Modern high-precision optical components, such as aspheres and freeform surfaces, require advanced and highly controlled manufacturing techniques. These methods include ion beam figuring, magnetorheological finishing, corrective bonnet polishing, and plasma jet etching. They achieve exceptionally low surface roughness and high depth accuracy while minimizing damage to the remaining glass or glass-ceramic material. However, many of these techniques necessitate vacuum environments, which significantly increase production costs and maintenance efforts.

Atmospheric Pressure Plasma Jet (APPJ) etching offers a dry, adaptable alternative for material removal under ambient conditions. This method employs fluorine-containing gases, activated by microwaves to produce fluorine radicals. These radicals react with the substrate material, forming volatile compounds. Fluorine-based atmospheric plasmas are already well-established for processing materials such as SiC, silicon, and fused silica. Optical materials based on silicon oxide are often doped with additional oxides to enhance their optical or thermal properties. Examples of such materials include N-BK7 and Zerodur®, which play a crucial role in the optical industry.

However, the inclusion of metal oxides in these materials leads to the formation of non-volatile by-products during APPJ etching. These residual compounds accumulate on the substrate surface, resulting in masking effects, reduced material removal rates, and increased surface roughness.

This study aims to demonstrate that laser pulses can effectively remove these residue layers. By combining laser processing with plasma jet etching, surface roughness can be drastically reduced. Additionally, the stability of the plasma jet etching process is enhanced, as the removal of residual layers prevents fluctuations in the etching rate.

In this presentation, various concepts for integrating laser processing with plasma jet processing will be introduced and discussed, using selected examples. The focus will be on technically significant materials such as N-BK7 and Zerodur®, highlighting their potential for improved processing outcomes.



Schematic representation of the experimental setup for combined plasma jet etching and laser irradiation

Stoßwellenbasierte Oberflächenreinigung von Insektenrückständen mittels CO_2 Laser

Anika Langebeck[1], Lewin Rathmann[1], Tim Radel[1,2]

1 Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, Klagenfurter Straße 5, 28359 Bremen

2 MAPEX – Center for Materials and Processes – Universität Bremen, Bibliothekstraße 1, 28359 Bremen

Laminar air flow technology on aircraft wings is used to reduce greenhouse gas emissions. However, this requires contamination-free surfaces which are achieved through cleaning. For this application shockwave-based laser cleaning on stainless steel (1.4544.9) and grade 5 titanium was investigated. Using a TEA-CO_2 laser (10.6 µm, 100 ns, 10 Hz), a reduction of the residues by 85% for stainless steel and 73% for titanium was achieved, without detectable changes in micro-hardness, topography or grain structure.

Der Luftverkehr ist mit einem Gesamtanteil von 5 % eine der Hauptverursacher von Treibhausgasen [Lia22]. Gleichzeitig ist er auch einer der Wirtschaftssektoren, die einen wesentlichen Beitrag dazu leisten können, ebendiese Treibhausgase in der Zukunft einzusparen. Um dies zu erreichen, wird bspw. die Laminar-Air-Flow-Technologie auf Flugzeugtragflächen eingesetzt. Diese ist vor allem dann besonders effizient, wenn die strukturierte Oberfläche frei von Fremdkörpern und Beschädigungen ist. Ein Beispiel hierfür sind Ansammlungen von Insektenrückständen an den Vorderkanten der Tragflächen. Aus diesem Grund ist eine regelmäßige Reinigung, bspw. mittels lasergestützter Reinigungsverfahren, erforderlich. Während die trockene und auch die flüssigkeitsgestützte Laserreinigung einige Nachteile hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den Oberflächenwerkstoff oder ihrer Praktikabilität aufweisen, kann die schockwellenbasierte Laserreinigung einen vielversprechenden Lösungsansatz bieten.

Im laufenden Forschungsvorhaben wurde die schockwellenbasierte Laserreinigung von künstlich erzeugten Insektenrückständen auf metallischen Oberflächen aus Edelstahl (1.4544.9) und Titan Grade 5 untersucht. Hierfür wurde ein TEA-CO_2 Laser mit 10,6 µm Wellenlänge, einer Pulsdauer von 100 ns und einer Pulsfrequenz von 10 Hz eingesetzt. Die Ergebnisse zeigten, die inhomogen verteilten Insektenrückstände um bis zu 85 % auf Edelstahl und 73 % auf Titan signifikant reduziert werden konnten. Als Messgröße wurde das Materialspitzenvolumen V_{mp} herangezogen. Durch die schockwellenbasierte Reinigung wurden weder Mikrohärte noch Oberflächentopographie oder Kornstruktur des Grundwerkstoffs messbar beeinflusst (siehe Abb. 1). Dies schafft die Grundlage für den Einsatz der laserbasierten Reinigung metallischer Oberflächen von organischen Rückständen wie Insekten.

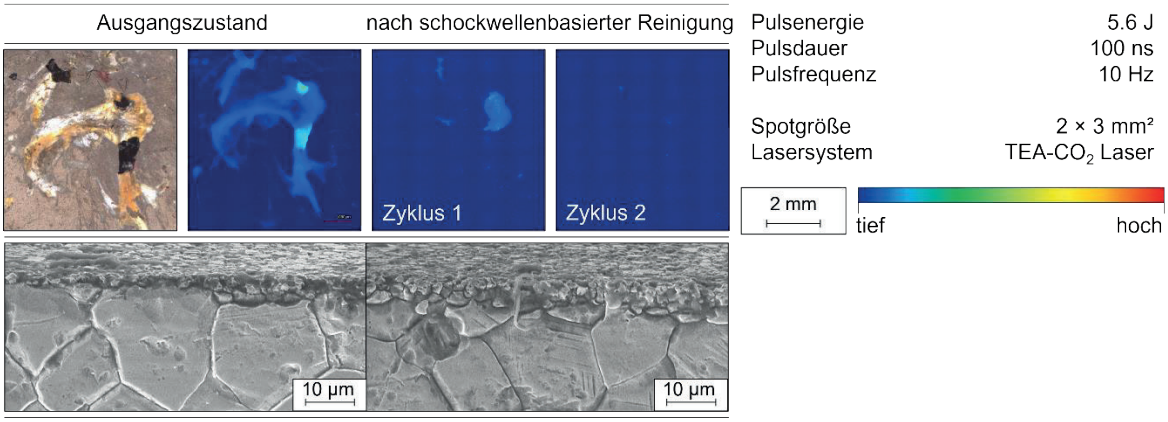


Abb. 1: 1.4544.9 Oberfläche mit Insektenresten vor und nach der schockwellenbasierten Laserreinigung. Topographie der Verunreinigung und Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Kornstruktur.

Danksagung

Das Projekt Ultra Performance Wing (UP Wing, Projekt-Nr.: 101101974) ist im Rahmen des Verbundprojekts Clean Aviation gefördert und durch seine Mitglieder unterstützt

Haftungsausschluss

Kofinanziert von der Europäischen Union. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autor:innen und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union oder des Verbundprojekts Clean Aviation wieder. Weder die Europäische Union noch die Bewilligungsbehörde können für sie verantwortlich gemacht werden.

Co-funded by the European Union

CLEAN AVIATION

SESSION 6

Lasermesstechnik

Moderation: Silvio Fuchs

Inline-Hochgeschwindigkeits-Infrarotmessung zur Prozesskontrolle bei der Bearbeitung von Diffusionsmedien für Brennstoffzellen mittels Ultrakurzpulslaser

Alexander Kaiser, Sebastian Funken, Harald Riegel
Hochschule Aalen, LaserApplikationsZentrum (LAZ), Beethovenstraße 1, 73430 Aalen

Die UKPL-Materialbearbeitung ermöglicht die Realisierung einer Vielzahl von temperaturkritischen Prozessen. Durch eine geeignete Parameterwahl sowie Bearbeitungsstrategien kann die Mikrostrukturierung zur Funktionalisierung von Materialoberflächen genutzt werden. Eine dieser Funktionalisierungen stellt der Eintrag von Mikrobohrungen in das Diffusionsmedium einer Brennstoffzelle dar, was zu einer Verbesserung der Zellleistung führt. Eine unkontrollierte Wärmeentwicklung während des UKPL-Abtragprozesses kann jedoch zur thermischen Schädigung des Diffusionsmediums führen und in einer Verringerung der Zellleistung resultieren. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt erstmals die Positionierung einer schnellen IR-Sensorik im Strahlengang zur Kontrolle der Wärmeentwicklung. Die Kombination dieser IR-Messtechnik mit einem Galvanometerscanner wird, im Hinblick auf den Einfluss der Dämpfung des IR-Signals, untersucht. Dadurch kann eine Inline-IR-Messung im dynamischen Bearbeitungspunkt realisiert werden, wodurch eine räumliche Zuordnung der Messwerte möglich ist.

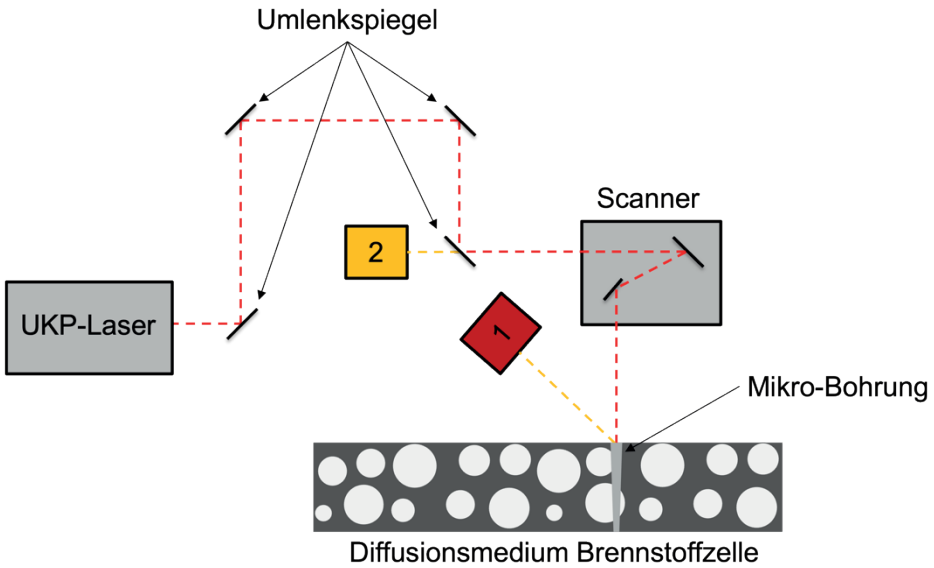


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus des Hochgeschwindigkeits-IR-Sensors innerhalb des Strahlengangs. Die Integration wird durch den Vergleich der Messsignale während des Mikro-Bohrens an Messposition (1) und (2) evaluiert. Hierbei wird zum einen die off-axis Position (1) als Referenz betrachtet, zum anderen wird die Integration des Sensors im Strahlengang (on-axis) untersucht (2). Anhand der Signalstärke dieser Messpositionen lässt sich der Einfluss der optischen Elemente (Scanner & Umlenkspiegel) im Strahlengang ermitteln.

Optische Inspektion komplexer Strukturen auf Basis physikalisch interpretierbarer neuronaler Netze

Leander Kläber, Alexander Karbardiadi-Virowski, Tobias Baselt, Christopher Taudt und Peter Hartmann

Fraunhofer IWS Dresden, Anwendungszentrum für Optische Messtechnik und Oberflächentechnologien (AZOM), 08056 Zwickau

Die detaillierte Analyse der Oberflächenstruktur vor und nach der Bearbeitung ist die wesentliche Voraussetzung für die gezielte Optimierung von Laserbearbeitungsprozessen, wie beispielweise der direkten Laserstrukturierung. Im Vortrag werden Ansätze zur inlinefähigen Strukturanalyse auf Basis physikalisch interpretierbarer neuronaler Netze diskutiert.

The detailed analysis of the surface structure before and after machining is the essential prerequisite for the targeted optimization of laser machining processes, such as direct laser structuring. The paper will discuss approaches for inline-capable structure analysis based on physically interpretable neural networks.

Die detaillierte Analyse der Oberflächenstruktur vor und nach der Bearbeitung ist die wesentliche Voraussetzung für die gezielte Optimierung von Laserbearbeitungsprozessen. Dabei ist die nachträgliche Vermessung mit mikroskopischen Techniken oft nicht hinreichend. Für industrielle Prozesse ist regelmäßig eine prozessbegleitende Analysetechnik notwendig. Im optimalen Fall können aus Strukturparametern auch direkte Prozessregelgrößen gewonnen werden.

Bei zahlreichen Anwendungen nutzt man unterschiedliche Bildauswertetechniken um photographische oder mik-roskopische Aufnahmen der zu untersuchenden Strukturen auszuwerten. Problematisch sind dabei insbesondere die großen Datenvolumina, welche eine vollständige Auswertung unterschiedlicher Strukturparameter bei großflä-chigen Laserprozessen in Prozessechtzeit begrenzen.

Ein alternatives Vorgehen ist die Bestimmung mittlerer Strukturparameter definierter Flächenelemente vermittelt durch eine zusätzliche optische Abbildung. Diese Techniken ermöglichen einerseits eine deutliche Reduktion der Datenströme bei einer online-Prozesskontrolle, erfordern aber andererseits zusätzliche mathematische Auswertemethoden.

Schlüsselelement der mathematischen Auswertung ist dabei die Bestimmung der Übertragungsfunktion der jeweiligen optischen Abbildung (Abb.1).

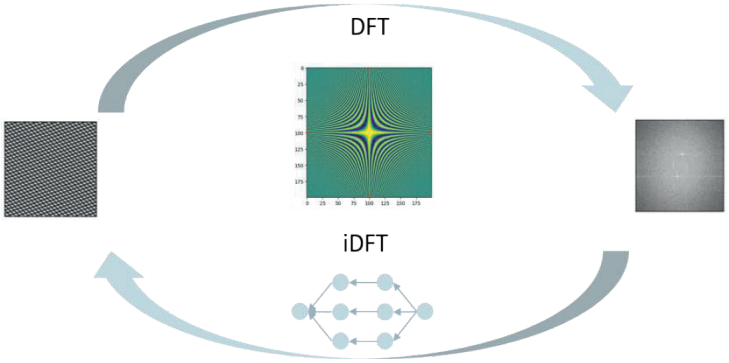


Abb. 1 Closed-loop Bestimmung der Übertragungsfunktion einer optischen Fourier-Transformation

Eine effektive Methode zur Bestimmung der Übertragungsfunktion ist der Einsatz neuronaler Netze auf Basis der physikalischen Eigenschaften der jeweiligen optischen Abbildung. Derartige Ansätze die u.a. unter dem Namen „physikalisch informierte/interpretierbare neuronale Netze“ bekannt sind ermöglichen eine effektive Bestimmung der Übertragungsfunktion.

Neben grundlegenden Aspekten dieser Technik werden im Vortrag an ausgewählten Beispielen die Möglichkeiten und Grenzen dieser Analysemethode diskutiert.

Rekonstruktion der Ablationsdynamik einer dünnen Goldschicht

Markus Olbrich, Theo Pflug, Andy Engel, und Alexander Horn
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Die Bestrahlung einer dünnen Goldschicht (Schichtdicke ca. 100 nm, inklusive einer Haftschicht von 20 nm Chrom) auf einem Glassubstrat mit Einzelpulsen von ultrakurz gepulster Laserstrahlung (Pulsdauer 40 fs, Wellenlänge 800 nm) führt zu einer stufenartigen Topographie der Ablationsstruktur. Die Entstehung dieser Topographie kann durch die Kombination der Simulation der Laserstrahlung-Materie-Wechselwirkung mit dem Zwei-Temperatur-Modell in Verbindung mit der Hydrodynamik (TTM-HD) und der abbildenden Pump-Probe-Messtechnik, hier Reflektometrie und Interferometrie, vom Femtosekunden- bis in den Mikrosekundenbereich erklärt werden. Der gewählte Ansatz liefert durch die Rekonstruktion der Ablationsdynamik grundlegende Einblicke in die Wechselwirkung dünner Metallschichten mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung und erhöht das Verständnis der dabei stattfindenden physikalischen Prozesse (u. a. Anregung des Elektronensystems, Entstehung von Stoßwellen, Spallation und Phasenexplosion) maßgeblich.

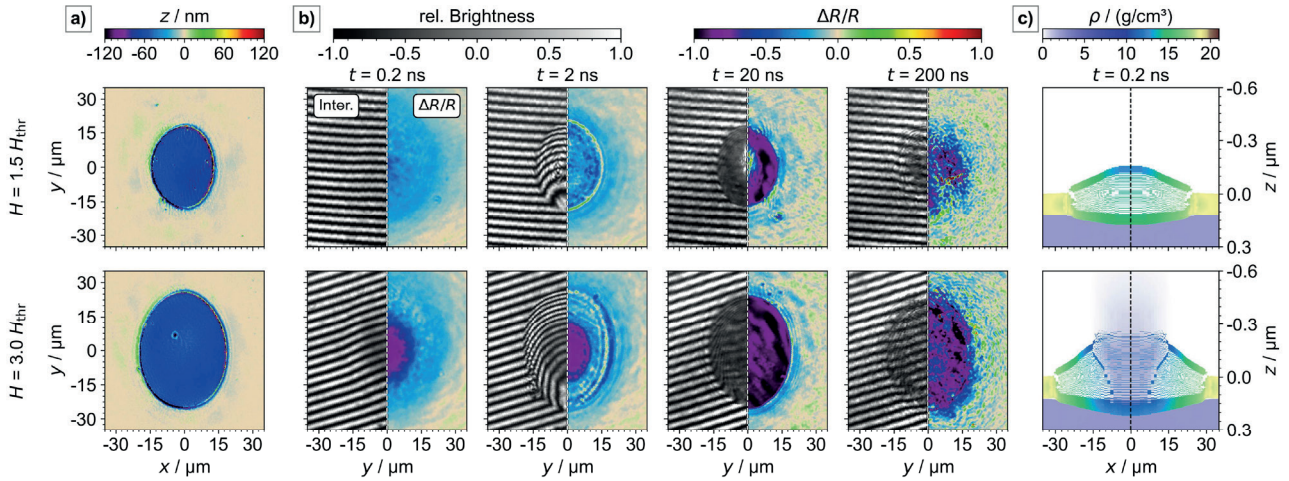


Abb. 1: a) Experimentell bestimmte Topographie der Ablationsstruktur nach Bestrahlung einer dünnen Goldschicht (Schichtdicke $d_z \approx 100$ nm, 20 nm Haftvermittler aus Chrom auf einem Glassubstrat) mit Einzelpulsen von ultrakurz gepulster Laserstrahlung (Pulsdauer $\tau_H = 40$ fs, Wellenlänge $\lambda_{Pump} = 800$ nm), b) gemessenes transientes Interferogramm (linker Halbraum) [1] und relative Änderung des Reflexionsgrades $\Delta R/R$ (rechter Halbraum) [2,3] für die Probe-Laserstrahlung ($\lambda_{Probe} = 532$ nm) zu vier verschiedenen Zeitpunkten und c) berechnete quasi zweidimensionale Verteilung der Dichte ρ mittels TTM-HD Simulationen [4] für $t =$ 0.2 ns; alle Darstellungen jeweils für eine Fluenz $H_0 = 1.5\ H_{thr}$ (obere Reihe) und $H_0 = 3.0\ H_{thr}$ (untere Reihe); $H_{thr} = 0.84$ J/cm².

Literaturverzeichns

[1] T. Pflug, M. Olbrich, H. Loheit, A. Horn, Appl. Phys. A **130**, 632 (2024)
[2] T. Pflug, P. Cejpek, M. Olbrich, C. Wüstefeld, M. Ernstberger, M. Motylenko, D. Rafaja, A. Horn, Opt. Laser Technol. **172**, 110540 (2024)
[3] T. Pflug, J. Pablo-Navarro, M.S. Anwar, M. Olbrich, C. Magén, M.R. Ibarra, K. Potzger, J. Faßbender, J. Lindner, A. Horn, R. Bali, Adv. Funct. Mater. **34**, 2311951 (2023)
[4] M. Olbrich, T. Pflug, C. Wüstefeld, M. Motylenko, S. Sandfeld, D. Rafaja, A. Horn, Opt Lasers Eng **129**, 106067 (2020)

ABSCHLUSSVORTRAG

Alexander Horn

Ultraschnelle optische Messtechniken für die Lasermaterialbearbeitung

Ultraschnelle optische Messtechniken für die Lasermaterialbearbeitung

Alexander Horn, Andy Engel, Phillip Börner und Markus Olbrich
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

In der Lasertechnik wird zunehmend komplex geformte Laserstrahlung, wie zum Beispiel Besselstrahlung, GHz Burst oder polarisations- oder phasengeformte Strahlung eingesetzt. Eine Schlüsselkomponente bei der Nutzung derartiger innovativer Strahlformen ist die ultraschnelle Messtechnik, die eine präzise Erfassung und Analyse der Prozesse ermöglicht. Diese Technik erlaubt die Beobachtung und Auswertung von extrem schnellen Ereignissen, die in der Materialbearbeitung, Medizin und Telekommunikation eine erhebliche Rolle spielen. Es werden mehrere optische Messtechniken, wie Reflektometrie, Ellipsometrie, Interferometrie [1,2] und Spektroskopie zur zeitaufgelösten Erfassung der Einzelpuls-Ablation von dünnen Metallschichten mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung präsentiert (siehe Abb. 1, links) und in Kombination mit Modellierungen der Abtragsprozess physikalisch interpretiert [3,4] (siehe Abb. 1, rechts). Die beobachteten Prozesse, wie das Heizen des Elektronensystems und des Phononensystem über das Schmelzen und Verdampfen, umfassen dabei Zeiträume über fünf Größenordnungen. Diese grundlegenden Erkenntnisse ermöglichen in Zukunft durch Steigerung der Qualität und Produktivität die Lasertechnik noch effizienter zu gestalten.

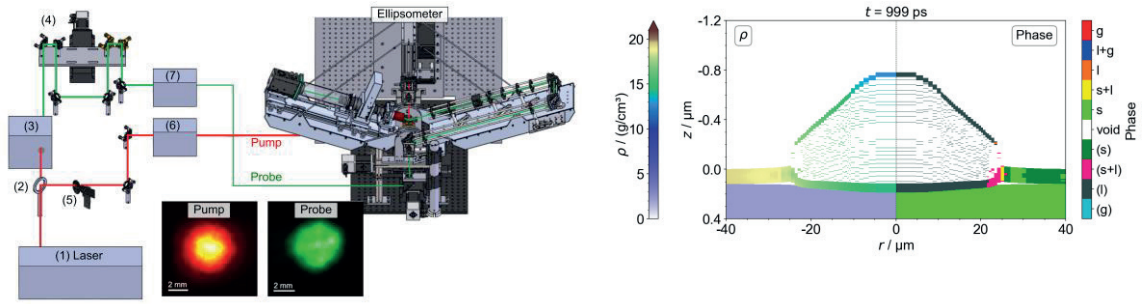


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines zeitaufgelösten Ellipsometers (links) und Simulation der Dichte und Phase einer dünnen Goldschicht ca. 1 ns nach der Bestrahlung mit einem Femtosekunden-Laserpuls (rechts).

Literaturverzeichnis

[1] T. Pflug, P. Cejpek, M. Olbrich, C. Wüstefeld, M. Ernstberger, M. Motylenko, D. Rafaja, A. Horn, Transient ablation topography of a thin chromium film after ultrashort pulsed laser irradiation in the spallation and phase explosion regime, Optics & Laser Technology, Volume 172, 2024, 110540, ISSN 0030-3992,

[2] Pflug, T., Olbrich, M., Loheit, H. et al. Ultrafast spallation dynamics of a thin gold film characterized by imaging pump-probe interferometry. Appl. Phys. A 130, 632 (2024). https://doi.org/10.1007/s00339-024-07797-w

[3] Alexander Horn, The Physics of Laser Radiation–Matter Interaction: Fundamentals, and Selected Applications in Metrology, Springer Nature Switzerland AG 2022 https://doi.org/10.1007/978-3-031-15862-9

[4] M. Olbrich, T. Pflug, C. Wüstefeld, M. Motylenko, S. Sandfeld, D. Rafaja, A. Horn, Hydrodynamic modeling and time-resolved imaging reflectometry of the ultrafast laser-induced ablation of a thin gold film, Optics and Lasers in Engineering 129 (2020) 106067

POSTERSESSION

Abstracts

Charakterisierung der durch ultrakurz gepulste Laserstrahlung erzeugten Ablationswolke mit zeitlicher, räumlicher und spektraler Auflösung

Phillip Börner, Markus Olbrich, Andy Engel und Alexander Horn
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Die Kenntnis der Geometrie und Ladungsträgerdichte, der durch ultrakurz gepulste Laserstrahlung erzeugten Ablationswolke ist wichtig, um die Wechselwirkung von gepulster Laserstrahlung mit Materie zu verstehen. Hierfür wird ein Versuchsaufbau präsentiert, welcher abbildende Verfahren mit Spektrographie kombiniert. Der Aufbau ermöglicht von der Ablationswolke den räumlich und spektral aufgelösten Reflexions- und Transmissionsgrad, die Phasenänderung, sowie die optische Emission (Abb. 1) in Abhängigkeit von der Zeit zu bestimmen. Die Anregung des Elektronensystems im Metall und die Erzeugung der Ablationswolke werden dabei durch Pump-Probe Reflektometrie und Interferometrie innerhalb der ersten Nanosekunden nach der Bestrahlung bestimmt. Die Emission der Ablationswolke wird durch die Kombination eines Spektrographen mit einer em-ICCD-Kamera gemessen. Der Aufbau erlaubt ein detailliertes Verständnis der Laserstrahlung-Materie-Wechselwirkung, insbesondere der Dynamik der Ablationswolke.

The knowledge of the geometry and charge carrier density of the ablation plume generated by ultrafast laser radiation is important to understand the interaction of pulsed ultrafast laser radiation with matter. For this purpose, an experimental setup is presented enabling to measure the spatially and spectrally resolved reflactence and transmittance, the phase change and the optical emission (Fig. 1) from the ablation plume as a function of time. The excitation of the electron system of the metal and the generation of the ablation plume are determined by pump-probe reflectometry and interferometry within the first nanoseconds after irradiation. The emission of the ablation cloud is measured by combining a spectrograph with an em-ICCD camera. The setup allows a detailed understanding of the laser-matter interaction, particulary the dynamics of the ablation plume.

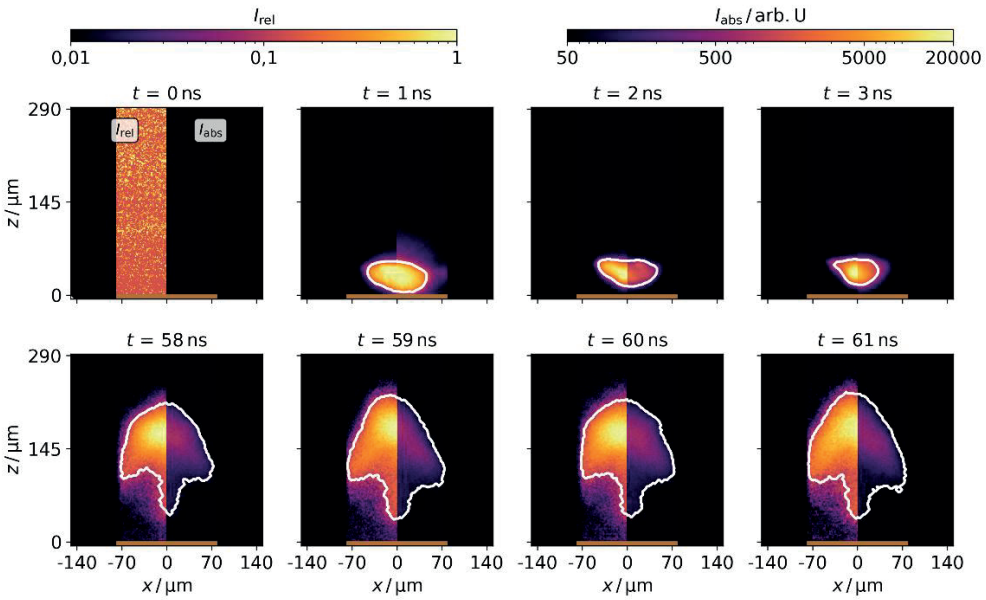


Abb. 1: Darstellung der ortsaufgelösten optischen Emission in zwei Halbräumen für ausgewählte Zeitpunkte nach der Anregung mit Laserstrahlung: relative Intensität I_{rel} links und absolute Intensiät I_{abs} rechts, mit weißer einhüllender Konturlinie bei $0{,}1 \cdot I_{rel_{max}}$

Entwicklung einer laserbasierten Technologie zur fälschungssicheren Markierung von additiv gefertigten Bauteilen mit optischen Mikrostrukturen

Kerstin Götze, Andreas Hopf, Elena Wettemann, Jens Bliedtner
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade, 07745 Jena

Produkte zu kennzeichnen, ist zu einer Standardaufgabe bei deren Herstellung geworden. So werden bspw. Barcodenummern aufgedruckt oder Etiketten direkt auf die Produkte und Verpackungen aufgebracht. Die handelsüblichen Kennzeichnungen weisen keine fälschungssichere Codierung der Produkte auf, wodurch Schutz und Rückverfolgbarkeit selten gegeben sind. Um diese Lücke zu schließen, werden in dem oberflächennahen Bereich von additiv gefertigten Bauteilen aus Kunststoff mittels Laserstrahlung gezielt Strukturelemente eingebracht. Das patentierte und innovative Markierverfahren kombiniert einen speziellen Formgebungsprozess mit einem Laserstrahlpolierprozess. Dazu werden Teile der additiv gefertigten Oberfläche abgetragen und gleichzeitig poliert. Durch die Entwicklung von geeigneten Prozessparameter können die Strukturelemente gezielt in die Bauteiloberfläche geschrieben werden. Ihre Charakterisierung zeigt, dass definierte Geometrien in Abhängigkeit der Laserparameter erreicht werden können.

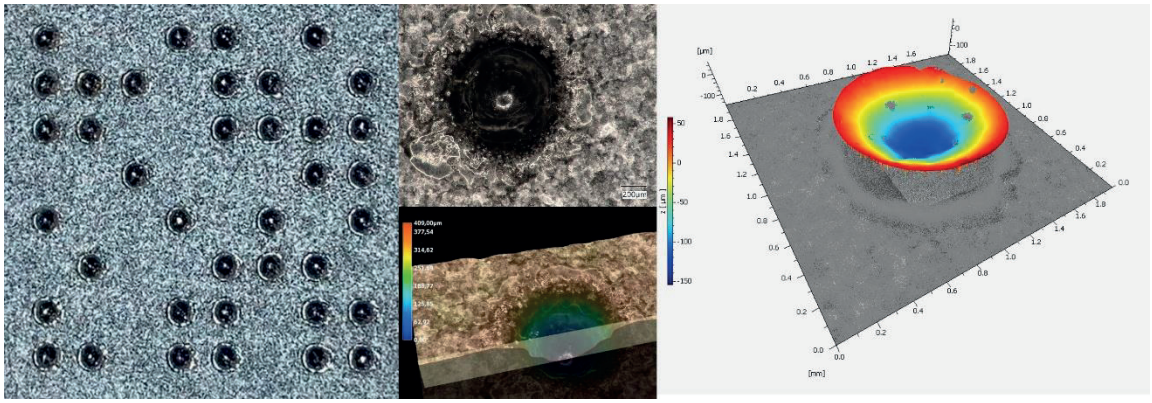
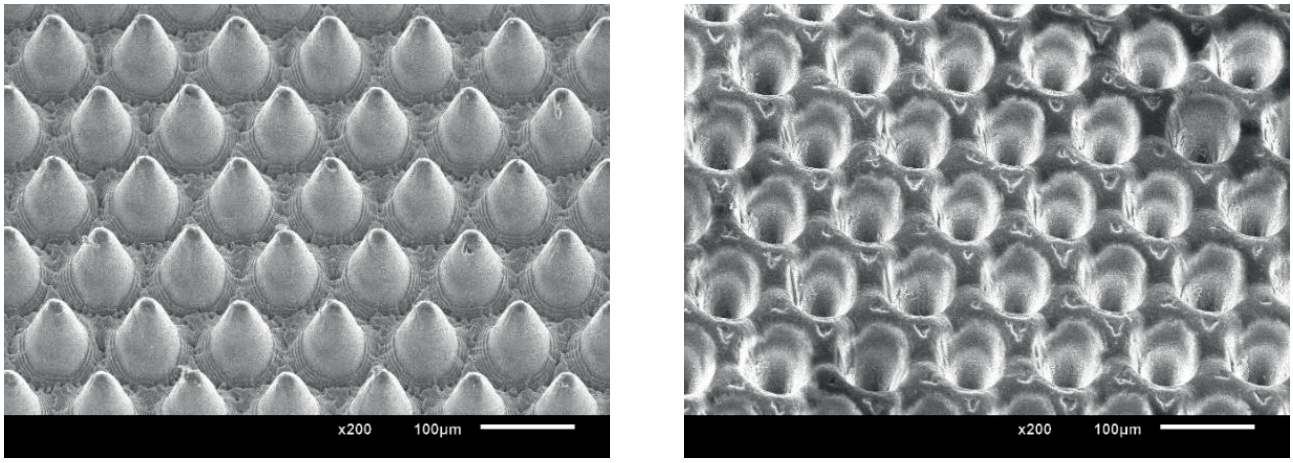


Abbildung 1: Darstellung der experimentellen Untersuchungen und deren Auswertung für die Generierung des Prozessfensters für die mikrooptischen Strukturelemente

Lasermikrostrukturierung zur Oberflächenfunktionalisierung von Spritzgussformen

Andreas Gruner, Jörg Schille, Udo Löschner
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Die Mikrostrukturierung von Spritzgußwerkzeugen zur weiterführenden Funktionalisierung von Kunststoffteilen ist seit einigen Jahren von wachsendem Interesse. So konnte bereits im Labormaßstab gezeigt werden, dass sich lasergefertigte Mikro- und Nanostrukturen sehr gut auf die Oberflächen der im thermischen Spritzgussverfahren hergestellten Kunststoffteile übertragen lassen [1-3].
In der vorliegenden Arbeit wird die Hochrate-Lasermikrobearbeitung von Spritzgussstahl 40CrMnMo7 für die Herstellung von Spritzgussteilen mit hydrophoben Oberflächeneigenschaften vorgestellt. In den Untersuchungen wurde ein Ultrakurzpuls-Lasersystem mit einer mittleren maximalen Laserleistung von 67 W verwendet. Zunächst wurden wichtige Prozessparameter wie Fluenz und Pulswiederholfrequenz variiert, um optimale Parametereinstellungen für eine hohe Fertigungsqualität bei gleichzeitig hohem Durchsatz zu ermitteln. Bei der Lasertexturierung der Spritzgusswerkzeuge stellte insbesondere die Mikrostrukturierung der Seitenwände eine besondere Herausforderung dar, da der Bearbeitungswinkel bei 45° lag, um schräge Mikrostrukturen zu erhalten, die für die Entformung des spritzgegossenen 3D-Teils benötigt werden [4]. Abschließend wurde der Einfluss der übertragenen Mikrostrukturgeometrie auf die Benetzungseigenschaften der Kunststoffoberflächen bewertet.



(a) (b)

Abb.1: REM-Aufnahmen einer laserstrukturierten Spritzgussform (Werkstoff: 40CrMnMo7) mit hexagonal angeordneter Mikrostruktur (Kegelhöhe und -abstand: 100 µm) (a) und dem gefertigten Polypropylen-Spritzgussteil (b).

[1] D. Masato, L. Piccolo, G. Lucchetta, M. Sorgato, Texturing technologies for plastics injection molding: a review, Micromachines 13, No. 8: 1211, (2022).

[2] X. Wang, H. Zheng, Y, Wan, W. Feng, Y.C. Lam, Picosecond laser surface texturing of a Stavax steel substrate for wettability control. Engineering, 4, 816-821, (2018).

[3] P.H. Wu, C.W. Cheng, C.P. Chang, T.M. Wu, J.K. Wang, Fabrication of large-area hydrophobic surfaces with femtosecond-laserstructured molds, Journal of Micromechanica and Microengineering, Vol. 21, No. 11, 7pp, (2011).

[4] D.G.K. Aboud, A. Gruner, A-M. Kietzig, Comparison of Laser micro-inscribed pillars on flat versus tilted substrates, Applied Physics A, 1057, (2022).

Effizienzbetrachtungen beim pulverbasierten DED-LB/M von Warmarbeitsstahl

Michael Güpner[1], Sebastian Böttcher[1], Frank Rempt[1], Jens Bliedtner[1], Henning Zeidler[2]

[1]Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

[2]Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestraße 6, 09599 Freiberg

Das pulverbasierte Laserstrahlauftragschweißen (DED-LB/M) ist ein vielfältiges Fertigungsverfahren zur Reparatur verschlissener Bauteile, zum Auftrag funktionaler Schichten oder zum additiven Strukturaufbau. Beim DED werden meist geringe Vorschubgeschwindigkeiten von wenigen mm/s angewendet. Um die Auftragrate zu steigern werden große Strahldurchmesser mit höheren Leistungen kombiniert. Daraus folgen hohe Energieeinträge und thermische Belastungen, die auf das Bauteils wirken. Eine Alternative dazu stellen kleine Strahldurchmesser kombiniert mit hohen Leistungen dar. Durch die resultierenden höheren Vorschubgeschwindigkeiten könnten thermische Verluste reduziert und die Prozesseffizienz gesteigert werden. Für Strahldurchmesser im Bereich von 2,5 bis 5 mm werden Parametersätze verschiedener Vorschubgeschwindigkeiten entwickelt, vergleichend im Rahmen einer Prozesscharakteristik betrachtet sowie deren Auswirkungen auf den dreidimensionalen Schichtaufbau diskutiert.

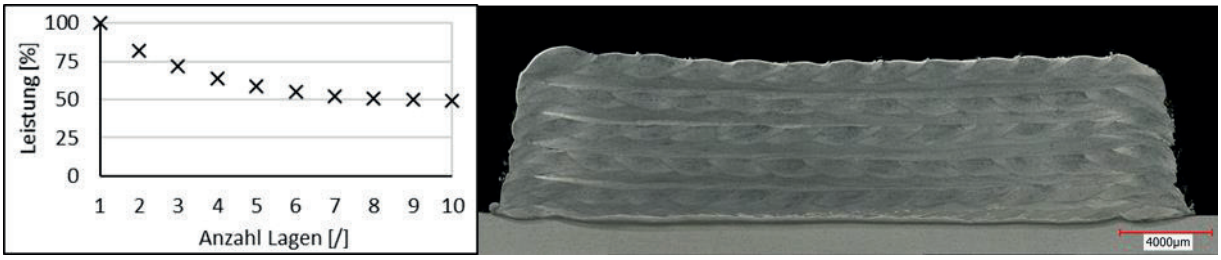


Abb. 1: Leistungsreduzierung beim Aufbau eines Quaders bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/s

Entwicklung eines additiven Verfahrens zur direkten Fertigung komplexer Glasbauteile mittels Faser-Extrusions-Technologie

Robin Hassel[1], Denis Just[1], Andreas Hopf[1], Jens Bliedtner[1], Robert Müller[2], Jan Dellith[2]

[1]Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

[2]Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V., Albert-Einstein-Str. 9, 07745 Jena

Im herkömmlichen Filament-3D-Druck werden üblicherweise Polymermaterialien verwendet. Hinsichtlich ihrer mechanischen, optischen und thermischen Eigenschaften und ihrer chemischen Resistenz weisen diese Nachteile gegenüber Glaswerkstoffen auf, was insbesondere die Einsatzgebiete der entsprechenden Bauteile einschränkt. Aus diesem Grund wird in einem Projekt ein neuartiges additives Verfahren zur direkten Fertigung komplexer Glasbauteile auf Basis einer Faser-Extrusions-Technologie entwickelt. Neben der Umsetzung eines experimentellen Laboraufbaus werden Untersuchungen zur laserbasierten Entfernung des (für einen zerstörungsfreien Transport des kontinuierlich zugeführten Faserfilaments erforderlichen) organischen Coatings unmittelbar vor dem Druckprozess sowie Versuche zur indirekten, laserbasierten Erweichung des Glasfaserfilaments durch Bestrahlung der Extrusionsdüse durchgeführt. Durch die derartige Generierung der Glasbauteile können die Applikationen auch auf bio-analytische, chemische und optische Anwendungen ausgedehnt werden.

Conventional filament-based 3D printing typically uses polymer materials. However, these materials have disadvantages compared to glass in terms of their mechanical, optical, and thermal properties, as well as their chemical resistance, which significantly limits the applications of the resulting components. For this reason, a project is being undertaken to develop an innovative additive manufacturing process for the direct production of complex glass components using a fiber extrusion technology. In addition to the implementation of an experimental laboratory setup, investigations are being conducted into the laser-assisted removal of the organic coating (necessary for the non-destructive transport of the continuously fed fiber filament) immediately prior to the printing process, as well as the indirect laser-based softening of the glass fiber filament through irradiation of the extrusion nozzle. This method of manufacturing glass components expands potential applications to include bioanalytical, chemical, and optical fields.

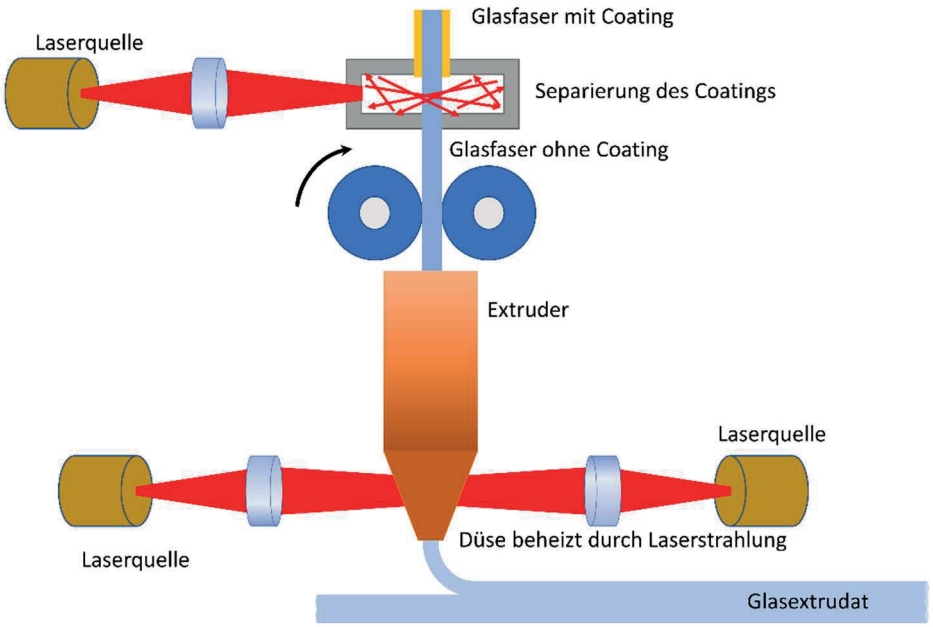


Abb. 1: schematische Prinzipskizze zur additiven Fertigung komplexer Glasbauteile mittels Faser-Extrusions-Technologie

Entwicklung eines Laserstrahlschneidprozesses für die effiziente Bearbeitung von keramischen Kompositmaterialien

Andreas Hopf, Kerstin Götze, Jens Bliedtner
Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade, 07745 Jena

Technische Keramiken zählen zu den Hochleistungswerkstoffen und ermöglichen durch ihre einzigartigen Eigenschaften den Einsatz in hochbeanspruchten Baugruppen, bei extremen Temperaturen oder aggressiven Umgebungen. Nachteilig für einen breiten Einsatz ist die kosten- und energieintensive Herstellung, die interessante Einsatzmöglichkeiten häufig unerschwinglich macht. Zur Einsparung von Energie sowie CO_2-Emissionen wird eine Schaumkeramik entwickelt. Komponenten aus Keramik, Kunststoff und Treibmittel werden zu einem Komposit modifiziert, welches extrudiert und gesintert werden kann. Vor dem Brennen muss eine Grünbearbeitung erfolgen. Durch die Laserstrahltechnologie sollen eine wirtschaftliche Segmentierung des Plattenmaterials und eine endformnahe Bearbeitung erfolgen. Für verschiedene Kompositmischungen werden entsprechende technologische Prozessfenster für die qualitätsgerechte Bearbeitung experimentell ermittelt. Im Rahmen der Charakterisierung des Laserstrahlschneidprozesses konnte die Prozesseffizienz gesteigert werden.

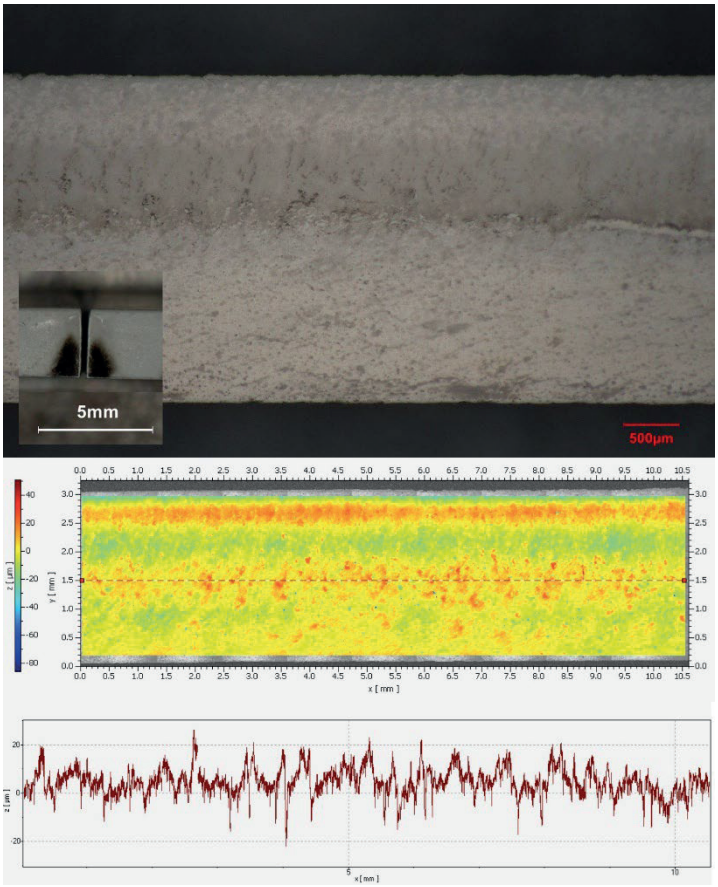


Abbildung 1: Darstellung von Schnittkante und -spalt sowie die dazugehörige Oberflächenmessung

Validierung eines 3D-Laserdruckverfahrenes zur Herstellung von formgebenden und dabei wasserabführenden Oberflächen

Matthias Horn, Jörg Schille, Lucas Naumann, Udo Löschner
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

In diesem Beitrag wird der aktuelle Ergebnisstand im Forschungsvorhaben 3D PorOLas vorgestellt. Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Erforschung und Validierung eines 3D-Laserdruckverfahrens zur Herstellung von porösen und dabei wasserabführenden Verlaufsstrukturen, die zukünftig in formgebenden Werkzeugen als Alternative zu Naturgips Einsatz finden sollen. Für das neue Verfahren ist ein hohes Anwendungspotential insbesondere bei der Herstellung von Industriekeramiken zu sehen. Im Unterschied zu konventionellen Metalldruckverfahren, bei denen eine relative Dichte von mehr als 99 % Werkstoffdichte sowie mechanische Eigenschaften vergleichbar zum Vollmaterial angestrebt werden, zeichnet sich das neu entwickelte Verfahren durch die Herstellung von Funktionseinsätzen mit einer definiert einstellbaren Porosität oder Dichtegradienten aus.

Für die spezifische Verwendung solcher Funktionsbauteile als Gipsersatz müssen die positiven Eigenschaften des Naturmaterials, wie geringe Oberflächenrauheit und ausreichende Porosität zum Wasserabtransport, abgebildet werden. Dies erfolgt im Laserdruckverfahren durch die Variation der Füllalgorithmen, um lokal kleine kapillarwirkende Öffnungen im Gefüge zu erhalten. Die wasserabführende Wirkung der lasergedruckten Funktionsschicht wird dabei durch die Materialdichte signifikant beeinflusst.

In diesem Posterbeitrag werden die technologischen Voraussetzungen für die Herstellung poröser Funktionsbauteile aufgezeigt und dabei auch der Einfluss des Laserbestrahlungsregimes auf die entstehenden Porengrößen diskutiert. Neben dem eigentlichen Abformverhalten sind die Porenfreiheit der Funktionsfläche im Abformwerkzeug sowie die Rauigkeit der abgeformten Fläche weitere zu bewertende Qualitätsmerkmale. Die Druckfestigkeit der lasergedruckten Funktionsoberfläche ist bis zu 11 MPa nachgewiesen. Anhand der Steighöhe wird abschließend die Abhängigkeit der Kapillarwirkung der Funktionsfläche von Porengröße und Schichtdicke dargestellt.

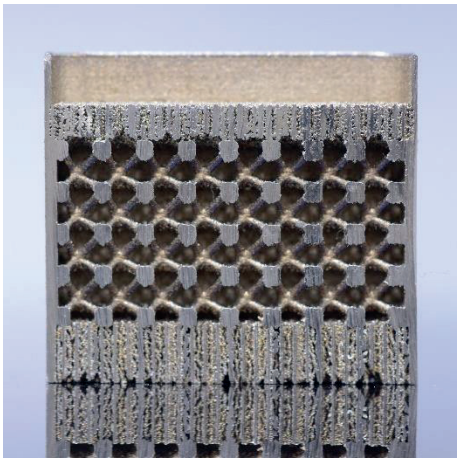


Abb.1: Körper (30x30x30 mm^3) mit Sandwich-Aufbau im Querschliff

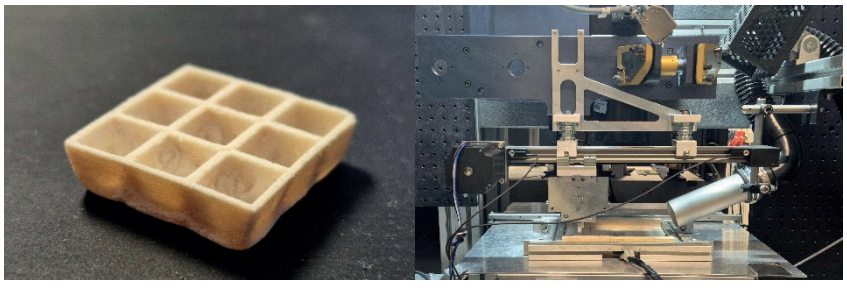
Abb.2: Abformung in Tonmaterial (Druck 2,16 MPa), gebrannt bei 1060 °C für 15 h

Femtosekundenlaser-gestützte LPBF-Prozessentwicklung für hochauflösenden PA12-3D-Druck

Markus Kühn[1], Felix Thumann[1], Andrea Barz[1], Jens Bliedtner[1], Sebastian Matthes[2], Markus May[2], Daniel Störzner[3]
[1]Ernst Abbe Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena,
[2]3Faktur GmbH, Göschwitzer Str. 22, 07745 Jena
[3]LCP Laser Cut Processing GmbH, Heinrich-Hertz-Straße 16, 07629 Hermsdorf

Diese Arbeit untersucht ein neuartiges Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Verfahren auf Basis eines Femtosekundenlasers zur Herstellung hochauflösender Bauteile aus PA12-Pulver. Durch die ultrakurzen Pulse (ca. 220 fs) wird der thermische Energieeintrag stark lokalisiert, was Überhitzungseffekte und Bauteilverzug erheblich reduziert. Somit lassen sich feinste Strukturen mit Wandstärken unter 100 µm sowie komplexe Geometrien mit hoher Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität realisieren. Die Untersuchungen umfassen die Evaluierung verschiedener Vorheizkonzepte, Pulverzuführstrategien und Prozessregelungen. Zudem werden kameragestützte Temperaturkontrollen eingesetzt, um Prozessparameter und Bauteileigenschaften aufeinander abzustimmen. Damit kann das vorgestellte Verfahren die Basis für neuartige Hochpräzisions-Bauteile aus PA12 und vergleichbaren Polymeren schaffen.

Im Rahmen des Projektes UKPiño wird der Ansatz verfolgt, mithilfe eines Femtosekundenlasers (Pulsdauer um ca. 220 fs) im Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Verfahren das Kunststoffpulver PA12 zu verarbeiten und dabei neue Herstellungsstrategien für hochpräzise 3D-Objekte in der additiven Fertigung zu entwickeln. Die extrem kurzen Pulse bewirken einen nahezu athermisch Prozess, bei dem der Energieeintrag räumlich und zeitlich stark begrenzt ist. Dadurch werden die lokalen Temperaturmaxima reduziert und die Wärmeeinflusszone minimiert, was zu geringerem Verzug, reduzierter Mikrostrukturschädigung sowie höheren Oberflächenqualitäten und Maßhaltigkeiten führt. Insbesondere im Vergleich zu herkömmlichen Lasersinterverfahren mit CO_2-Lasern lassen sich durch den Femtosekundenbereich feinere Details abbilden, was die Fertigung komplexer Geometrien mit Wandstärken unter 100 µm sowie filigraner Strukturen ermöglicht. Ein zentrales Element der Prozessoptimierung ist die genaue Abstimmung von Laserleistung, Pulsfolgefrequenz, Fokusdurchmesser und Scangeschwindigkeit. Ergänzend spielen Vorheizstrategien und eine optimierte Pulverzuführung eine entscheidende Rolle, um gleichmäßige Schichteigenschaften zu gewährleisten. Im Vergleich zu konventionellen additiven Herstellungsverfahren wird für den Schichtaufbau das Bauteil nicht schichtweise abgesenkt, sondern das Werkzeug, der Laser, schichtweise angehoben. Durch eine kamerabasierte Temperaturüberwachung, gekoppelt mit intelligenten Steueralgorithmen, lässt sich die Wärmeführung im Bauraum gezielt anpassen, um konstante Materialeigenschaften und reproduzierbare Qualitätsparameter sicherzustellen.



Links: PA12-Struktur (20 x 20 x 4) mm³ im LPBF-Verfahren mittels Femtosekundenlaser erzeugt; rechts: Vorrichtung zum invertierten Schichtaufbau mit Vorheiztechnik

Das Projekt UKPiño VP3, Förderkennzeichen 03RU2U033I, ist eine Initiative des Förderprogramms RUBIN und wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Bildung und Forschung
RUBIN Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation

Laserbasiertes Pulverbettschmelzen von Glasmaterialien mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

Anne-Marie Layher[1], Sarah Kaden[1], Jens Bliedtner[1], Olaf Schumann[2], Christina Schütze[2], Johannes Buchheim[3], Arne Teiwes[3], Christian Rieck[3], Patrick Hähle[4], Daniel Störzner[4]

[1] Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

[2] IL Metronic Sensortechnik GmbH, Mittelstraße 33, 98693 Ilmenau-Unterpörlitz

[3] Glatt Ingenieurtechnik GmbH, Nordstraße 12, 99427 Weimar

[4] LCP Laser-Cut-Processing GmbH, Heinrich-Hertz-Straße 16, 07629 Hermsdorf

---

Komplexe elektronische Schaltungen und Komponenten erlangen in zahlreichen Anwendungen und Märkten zunehmende Bedeutung. Um bspw. eine zuverlässige und hermetisch dichte Durchkontaktierung von einem Messmedium zu einer Auswerteelektronik unter anspruchsvollen Umgebungsbedingungen zu gewährleisten, können Glasdurchführungen verwendet werden. Serienmäßig werden Glasdurchführungen in einem zeitaufwendigen Ofenprozess hergestellt, bei dem der Glaskörper inklusive des Gehäuses und der elektronischen Kontakte auf die Schmelztemperatur des Glases erwärmt werden muss, um die beiden Materialien (Glas und Metall) form- und materialschlüssig fügen zu können. Hierbei gestaltet sich die Fertigung des Glaskörpers als besonders aufwendig, da die Formgebung durch Pressen von Glaspulvern unter Verwendung individueller Presswerkzeuge realisiert wird.

Hingegen könnte der Einsatz von additiven Fertigungsverfahren für die Herstellung komplexer, individuell gestaltbarer Glasprodukte auch für geringe Losgrößen eine Alternative darstellen. Bspw. kann das laserbasierte Pulverbettschmelzen bereits für Metalle und Polymere verwendet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wird eine Prozesskette für das laserbasierte Pulverbettschmelzen von Glaspulvern mittels ultrakurzgepulster (UKP) Laserstrahlung entwickelt. Diese beinhaltet die Produkt-, Material-, Anlagen-, und Prozessentwicklung. Es werden Fertigungsgrenzen von rotationssymmetrischen Bauteilgeometrien anhand unterschiedlicher Bohrungsdurchmesser untersucht.

Hierzu werden feinskalige Pulvermaterialien entwickelt, welche einen Partikeldurchmesser < 10 µm aufweisen sollen und deren Prozesseignung bzgl. der Realisierung eines homogenen Pulverbettes modifiziert werden. So konnte ein borosilikatisches Pulvermaterial mit teilweise sphärodisierter Partikelform mittels Pulversynthese erfolgreich hergestellt werden. Des Weiteren wird die Prozesseignung der Pulvermaterialien durch die Entwicklung eines neuen Pulvertransportsystems unterstützt. Grundlage hierfür bildet die „Inverse Schichterzeugungskinematik“, welche modular in die UKP-Lasermaterialanlage integriert ist, s. Abb. 1.

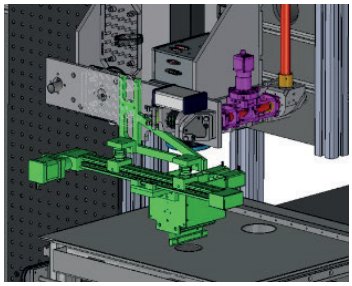


Abb. 1: Inverse Schichterzeugungskinematik

In den anschließenden Untersuchungen zum laserbasierten Pulverbettschmelzen werden material- und prozessspezifische Verfahrensgrenzen in Abhängigkeit der erreichbaren Bauteilqualität ermittelt. Die Charakterisierung der Verfahrensgrenzen ermöglicht Erkenntnisse bezüglich des Sinter- und Schmelzgrades, der erzeugten Bauteildichte sowie der Fertigungstoleranz. So können Prozesstemperaturen bis zum Bereich der theoretischen Verarbeitungstemperatur (Tp = 1270 °C) sowie Bauteildichten von ρ = 80 % im Vergleich zu kommerziellem Borosilikatglas erreicht werden. Des Weiteren wurden Bohrungsdurchmesser von d < 1 mm generiert, s. Abb.2.

Das laserbasierte Pulverbettschmelzen mittels ultrakurzgepulster Laserstrahlung bietet durch das neuentwickelte Pulvertransportsystem, in Verbindung mit angepassten Pulvermaterialien, einen hohen Innovationsgrad insbesondere bei Materialsystemen, die z.B. aufgrund hoher Verarbeitungstemperaturen bislang nicht favorisiert wurden. Damit ergeben sich völlig neue Möglichkeiten in der Produktenwicklung neuartiger Glasdurchführungen.

Abb. 1: Glasstruktur und erreichbare Bohrungsdurchmesser

Kofinanziert von der Europäischen Union

Die Arbeiten entstanden im Rahmen des Verbundprojektes Multiglas (2023 VFE 0020). Das Vorhaben wird durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert.

Untersuchungen zur Erzeugung von Mikrostrukturen mit großen Wandwinkeln mittels ultrakurzer Laserpulse

Peter Lickschat[1], Kristin Beyreuther[2], Konstantin Härtel[2], Antje Zösch[2], Steffen Weißmantel[1]

[1] Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

[2] imq – Ingenieurbetrieb GmbH, Gewerbering 30, 08451 Crimmitschau

Die Herstellung von Mikrostrukturen mittels ultrakurzer Laserpulse in unterschiedlichsten Materialien ist ein Fertigungsverfahren, das in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Ein dabei auftretendes Problem sind die maximal erreichbaren Wandwinkel der Mikrostrukturen. Aufgrund der derzeit verwendeten Bearbeitungsstrategien, bei denen überlappende Bearbeitungslinien, bestehend aus sich ebenfalls überlappenden Laserpulsen, zur Erzeugung des erforderlichen Volumenabtrags verwendet werden, sind die maximal erreichbaren Wandwinkel begrenzt. Die hier vorgestellten Untersuchungen und die dabei erzielten Ergebnisse zeigen Einflussgrößen auf, mit denen die erzeugbaren Wandwinkel erhöht werden können. Dabei konnten sowohl Laserparameter als auch Bearbeitungsstrategien identifiziert werden, mit denen Mikrostrukturen mit Wandwinkeln bis zu 90° erzeugt werden können.

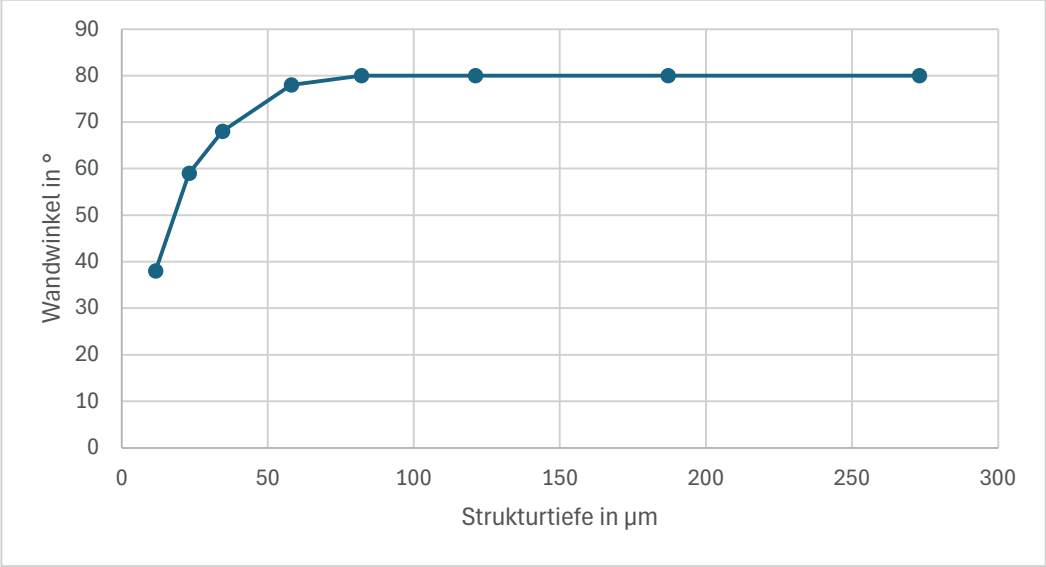


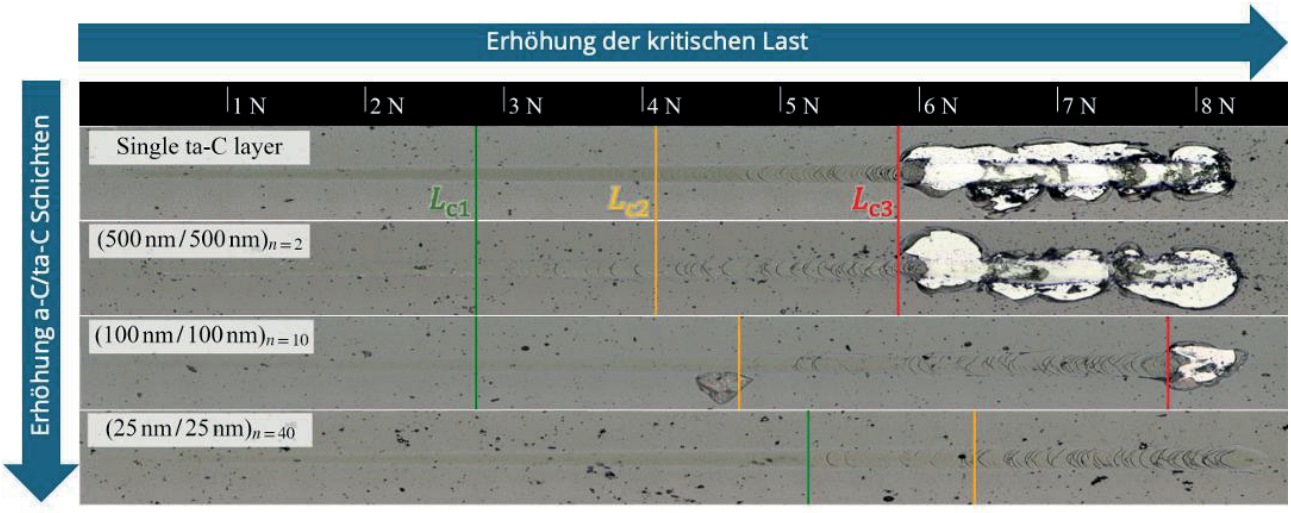
Abbildung 1: Wandwinkel in Abhängigkeit der Strukturtiefe bei der Verwendung eines Strahlradius von 8 µm

Innovative a-C/ta-C-Multischichtsysteme: Eigenschaften und Herstellung durch Laserpulsabscheidung

Daniel Metzner, Falko Jahn, Laura Dienelt, Steffen Weißmantel
Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

Die außergewöhnlichen mechanischen und chemischen Eigenschaften superharter ta-C-Beschichtungen eröffnen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Einschränkungen wie hohe Unterschiede in der Steifigkeit zwischen Schicht und Substrat, unzureichende Zähigkeit, begrenzte Haftung und interne Spannungen schränken jedoch ihre breitere Nutzung ein. In dieser Studie wurden superharte, wasserstofffreie a-C/ta-C-Multischichtsysteme durch Excimer Laserpulsabscheidung (Pulsed Laser Deposition PLD) hergestellt, um deren mechanische Eigenschaften im Vergleich zu ta-C-Einzelschichten zu optimieren. Die sp^2/sp^3-Hybridisierung der Kohlenstoffschichten wurde mittels Raman-Spektroskopie untersucht, während mechanische Eigenschaften durch Nanoindentation und tribologische Pin-on-Disk-Messungen analysiert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass Variationen in der Anzahl und der Dicke der Subschichten die Haftung signifikant verbessern, während die mechanischen Eigenschaften der a-C/ta-C-Multischichtsysteme mit denen von Einzelschichten vergleichbar sind.

The exceptional mechanical and chemical properties of superhard ta-C coatings make them highly versatile for various applications. However, challenges such as the high stiffness ratio between the film and substrate, insufficient toughness, limited adhesion, and internal stresses restrict their broader application. In this study, superhard, hydrogen-free a-C/ta-C multilayer systems were produced using pulsed excimer laser deposition (PLD) with the objective of optimizing their mechanical properties compared to ta-C single layers. The sp^2/sp^3 hybridization of the carbon layers was characterized by Raman spectroscopy, and their mechanical properties were assessed using nanoindentation and pin-on-disk tribological measurements. The results indicate that variations in the number of layers and the thickness of individual sublayers lead to a significant improvement in adhesion, while the mechanical properties of the multilayers were comparable to those of single ta-C layers.



- Rockwell-C-Kratztests unter Verwendung einer kegelförmigen Diamantspitze mit einem Radius von 50 µm und einem Kegelwinkel von 120°
- Gesamtschichtdicke der Einzelschicht aus ta-C und der a-C/ta-C-Multischichten beträgt 2 µm
- Signifikante Verbesserung der Haftung durch Erhöhung der Anzahl *n* an a-C/ta-C-Doppelschichten bei gleichzeitiger Reduzierung der Subschichtdicke

Einfluss zeitlicher Pulsabstände ultrakurzer Laserpulse auf die SiO_2-Ablation

Jonas Opitz, Peter Lickschat, Daniel Metzner, Manuel Pfeiffer, Philipp Rebentrost, Steffen Weißmantel

Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Der Einsatz hochfrequenter Pulsfolgen ultrakurzer Laserpulse (Bursts) ermöglicht einen effizienten und qualitativ hochwertigen Abtrag verschiedenster Materialien. Im Gegensatz zu Untersuchungen an Metallen existieren nur wenige Studien zur Ablation von SiO_2. In dieser Arbeit wurde die Wechselwirkung von bis zu zehn Laserpulsen mit SiO_2 untersucht, wobei die Pulsdauer, der zeitliche Pulsabstand und die Fluenz pro Laserpuls variiert wurden. Die erzeugten Kavitäten wurden quantitativ mittels Laserscanning- und qualitativ mittels Rasterelektronenmikroskopie charakterisiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse legen nahe, dass Pulsabstände im Millisekundenbereich Rissbildung und einen unkontrollierten Materialabtrag begünstigen. Pulsabstände im Nano- und Pikosekundenbereich ermöglichen hingegen einen kontrollierten und rissfreien Abtrag, der jedoch mit einem geringeren ablatierten Materialvolumen einhergeht.

The use of high-frequency sequences of ultrashort laser pulses (bursts) allows efficient and high-quality ablation of a wide range of materials. In contrast to investigations on metals, there are only a few studies on the ablation of SiO_2. In this work, the interaction of up to ten laser pulses with SiO_2 was investigated, with variations in pulse duration, temporal spacing and fluence per laser pulse. The cavities created were characterized quantitatively by laser scanning and qualitatively by scanning electron microscopy. The results indicate that laser pulse spacings in the millisecond range lead to uncontrolled crack formation and material removal. In contrast, nanosecond and picosecond laser pulse spacings allow controlled and crack-free ablation, resulting in a reduced ablated material volume.

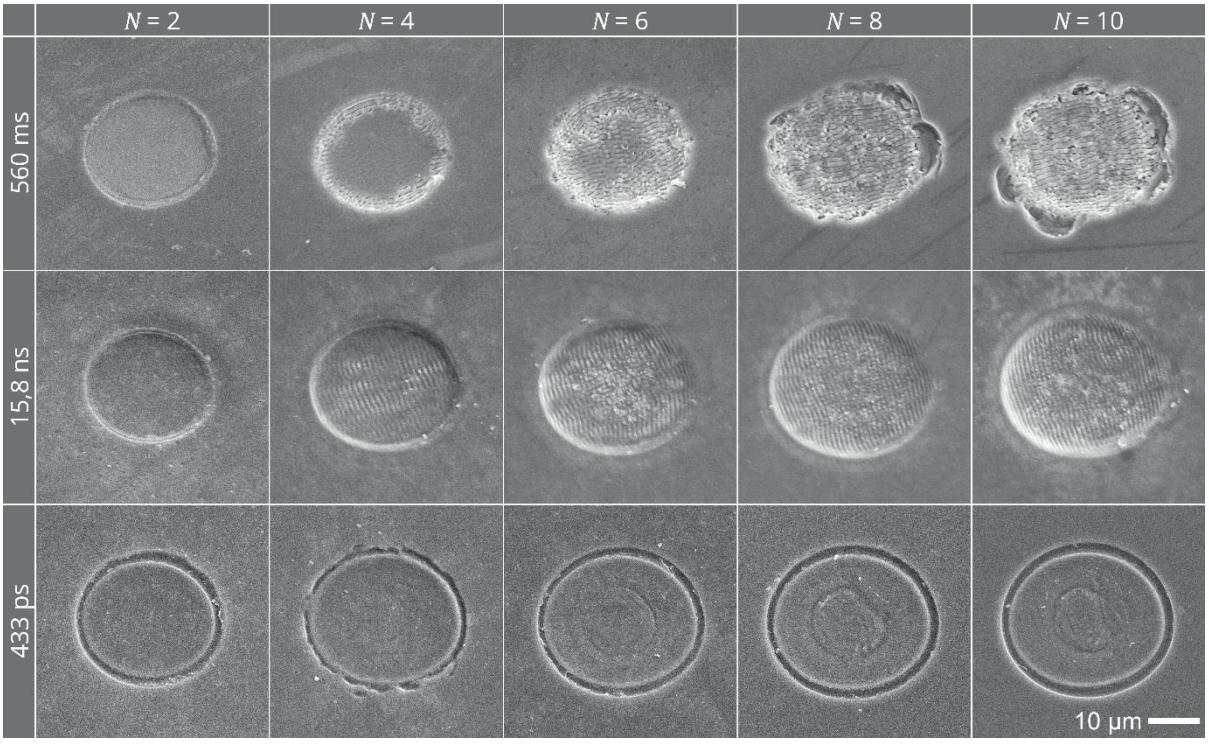


Abbildung 1: REM-Aufnahmen der erzeugten Kavitäten in Abhängigkeit von der Anzahl an Laserpulsen und dem zeitlichen Pulsabstand bei einer Pulsdauer von 200 fs und einer Fluenz pro Laserpuls von 14,6 J/cm²

Zerstörungsfreie und berührungslose Bestimmung des E-Moduls unter Verwendung der laserinduzierten Schockwellenanregung

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

Bei dem hier vorgestellten Messverfahren handelt es sich um eine neu entwickelte opto-akustische in-situ Messtechnik zur zerstörungsfreien und berührungslosen Bestimmung von E-Modulwerten, die zur Charakterisierung der Materialqualität und zur Ermittlung von Defekten z.B. an Träger-, Halbzeug- und Baustoffmaterialen eingesetzt werden kann. Grundlage dieses Verfahrens ist einerseits die berührungslose Einkopplung hochenergetischer kurzer Laserpulse in die Materialoberfläche zur Generierung von laserinduzierten Schockwellensignalen und andererseits die berührungslose Abtastung der so erzeugten Schwingungsmuster mittels Laser-Doppler-Anemometrie. Aus den so gewonnenen Daten wird anschließend die frequenzabhängige Phasengeschwindigkeit mit Hilfe der „Multichannel Analysis of Surface Waves" (MASW) berechnet. Die finale Bestimmung des E-Moduls, ggf. den einzelnen Schichten des Probekörpers zugeordnet, erfolgt dann durch iterative Lösung der mathematischen Beschreibung der Inversion des Modells zur Vorhersage der Phasengeschwindigkeit von Lamb-Wellen.

Technische Ausrüstung

Die Grundlage zur Schockwellenanregung mittels hochenergetischer Laserpulse bildet ein SpitLight Festkörperlasersystem von der Firma InnoLas Laser GmbH mit einer Wellenlänge von 1064 nm, einer Pulsdauer von 6 - 8 ns und einer Pulsenergie auf der Probenoberfläche von bis zu 2500 mJ. Für die Abtastung der Schwingungsmuster mittels Laser-Doppler-Anemometire wurde ein Einpunkt-Laservibrometer VFX VibroFlex QTec von der Firma Polytec GmbH mit einer Signalauflösung von 100 kHz verwendet.

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 W/cm² erfolgt infolge des Materialabtrags vom Probekörper mit Abtragstiefen pro Puls von 10 nm bis 100 nm eine explosionsartige Plasmabildung. Durch die Plasmaexpansion wird ein gegenwirkender Kraftstoß hervorgerufen, in dessen Folge eine resultierende Schockwelle im Probekörper entsteht, die sich in Form eines Körperschallfeldes 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.

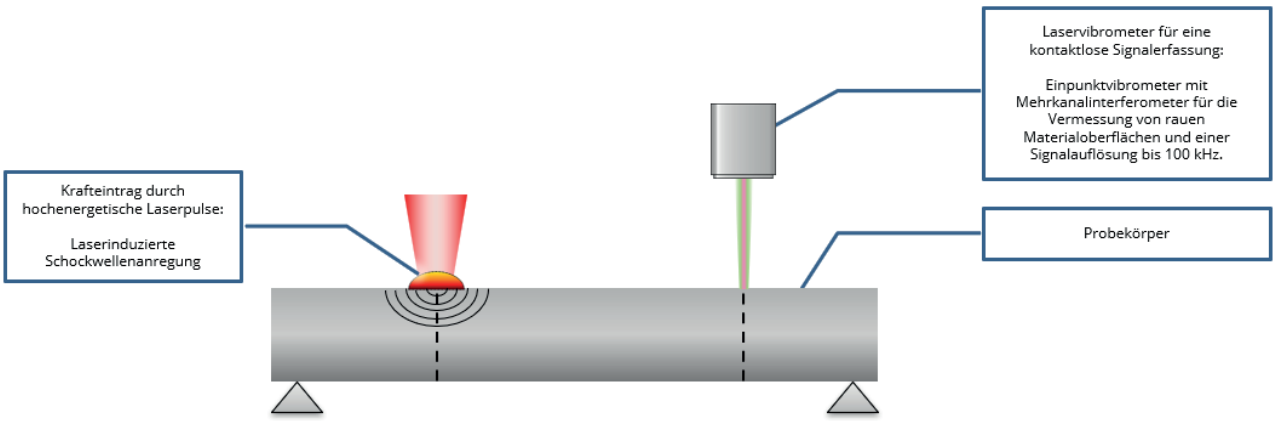


Abb. 1: Schematische Darstellung des berührungslosen opto-akustischen Messverfahrens zur Bestimmung des E-Moduls von kompakten und endlichen Probekörpern unter Verwendung der laserinduzierten Schockwellenanregung und der Abtastung der so erzeugten Schwingungsmuster durch Laser-Doppler-Anemometrie mittels eines Laservibrometers.

Flächengravierung von Spritzgusswerkzeugen mittels Hochgeschwindigkeits-Polygonscanner

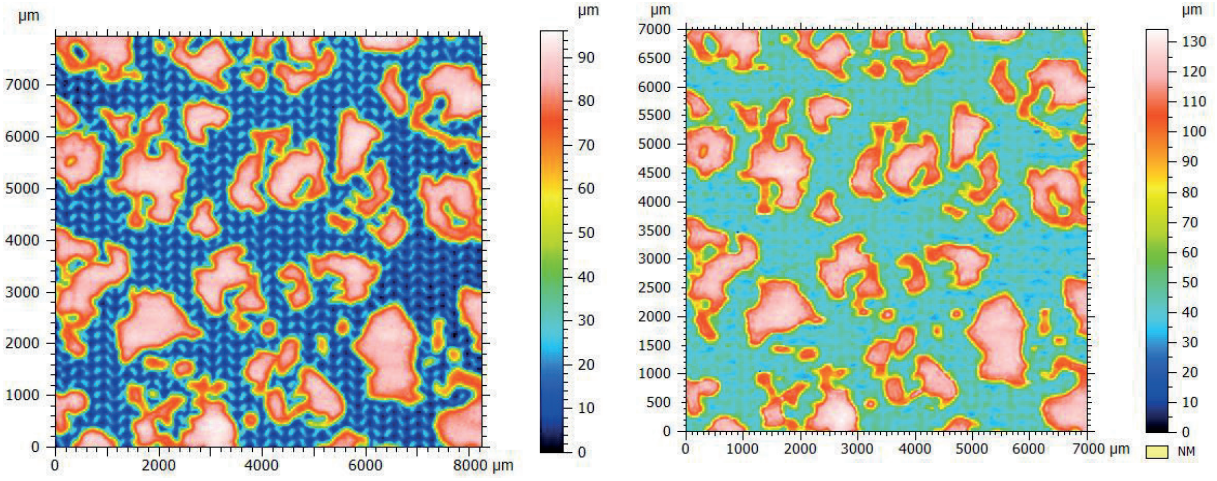
Marcel Wolf[1], Gianluca Deninno[2], André Streek[1], Nello Li Pira[2], Tanja Onofrio[3], Alessio Onofrio[3]

[1] Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

[2] Centro Ricerche Fiat, C.so Settembrini 40, 10135 Turin, Italy

[3] Onostampi S.R.L., Via Piave 49, 21020 Bardello(VA), Italy

Heutzutage hat die Lasertechnologie einen festen Platz in der Industrie. Es wird viel Arbeit in die Verbesserung der Verfahren gesteckt. Dabei spielt die Effektivität eine wichtige Rolle. Immer mehr Teile sollen bei gleicher oder verbesserter Qualität in kürzerer Zeit hergestellt werden. Dies wird zum einen durch die ständige Weiterentwicklung der Lasergeräte und zum anderen durch neue Strahlführungssysteme erreicht. Wenn mehr mittlere Leistung und höhere Repetitionsraten auf dem Markt verfügbar sind, ist die Strahlablenkgeschwindigkeit der nächste Parameter, der auf dem Weg zu einem schnelleren Prozess erhöht werden kann. Im folgenden Beitrag wird die erfolgreiche Realisierung eines industrienahen Gravurprozesses für ein Plastik-Spritzgusswerkzeug mit ultrakurz gepulsten Laserstrahlung in Kombination mit einem Hochgeschwindigkeits-Polygonscansystem gezeigt und erläutert. Ziel der Versuche war es, große Strukturierungsflächen durch Zusammenfügen von sich wiederholenden Strukturen unter Verbesserung der Strukturübergänge zu erzeugen. Anschließend wurden die Strukturen vermessen und hinsichtlich der Strukturtiefe, der Qualität sowie der Funktionalität des Werkzeuges bewertet.



(a) (b)

Abb. 1: a) Höhenprofil der entworfenen Struktur, b) Messung einer in Plastik übertragenen Struktur.

Surfalize – Eine Python-Bibliothek zur Oberflächenanalyse

Frederic Schell[1], Christoph Zwahr[1], Andrés Fabián Lasagni[1,2]
[1]Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS , Winterbergstraße 28, 01129 Dresden
[2]Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, George-Bähr-Str. 3c, 01069 Dresden

Die Analyse der Oberflächentopographie und Rauheit gemäß ISO 25178 ist entscheidend für funktionalisierte Oberflächen, besonders bei laser-mikrostrukturierten Anwendungen. Aktuelle proprietäre Software ist teuer und schwer erweiterbar. Surfalize *ist eine Open-Source-Python-Bibliothek, die gängige Nachbearbeitungsaufgaben und ISO-konforme Rauheitsparameter berechnet, verschiedene Mikroskop-Dateiformate unterstützt und sich in Python-Datenanalyse-Workflows integrieren lässt.*

Surface topography and roughness analysis according to ISO 25178 is crucial for functional surfaces, especially in laser-microtextured applications. Current proprietary software is expensive and hard to extend. Surfalize *is an open-source Python library that performs common post-processing tasks and calculates ISO-compliant roughness parameters. It supports various microscope file formats and integrates into Python data analysis workflows.*

Die Analyse der Oberflächentopographie und Rauheit gemäß ISO 25178 spielt eine entscheidende Rolle im Verständnis funktionalisierter Oberflächen. Im Bereich der laser-mikrostrukturierten Oberflächen werden zusätzlich zu den standardisierten Parametern oft benutzerdefinierte Parameter wie die räumliche Periode, die Spitzen-zu-Tal-Tiefe und die Texturhomogenität bewertet. Derzeit basiert die Nachbearbeitung und Parameterberechnung für mit dem Mikroskop gemessene Oberflächen auf einer begrenzten Anzahl von proprietären Softwarepaketen, die teuer sind und nicht allen Forschern zur Verfügung stehen. Darüber hinaus bieten sie nur eingeschränkte Batch-Funktionalitäten, was aufgrund der steigenden Nachfrage nach großen Datensätzen im Zusammenhang mit der Einführung von maschinellen Lernanwendungen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Zuletzt sind sie schwer mit benutzerdefinierter Funktionalität zu erweitern und nicht gut für die Integration in andere Softwareanwendungen geeignet.

Um diese Probleme zu adressieren, stellen wir die Open-Source-Python-Bibliothek surfalize vor. Sie bietet gängige Nachbearbeitungsoperationen wie Nivellierung, Filterung und Schwellenwertbestimmung sowie die Berechnung von Oberflächenrauheitsparametern gemäß ISO 25178 und arbeitet mit einer großen Anzahl von Konfokalmikroskop-Dateiformaten. Da sie rein auf Python basiert, kann sie von anderer Software genutzt werden und lässt sich gut in etablierte Python-Datenanalyse-Workflows integrieren, da sie Zugang zum gesamten wissenschaftlichen Python-Ökosystem ermöglicht. Schließlich implementiert sie die Berechnung von Parametern, die spezifisch für periodische Oberflächentexturen sind, wie die Strukturtiefe, die dominante Orientierung, die räumliche Periode und die Homogenität. Wir präsentieren die neuartigen Algorithmen und validieren die Parameterberechnungen anhand eines Datensatzes von lasertexturierten Oberflächen im Vergleich zu etablierter Software.

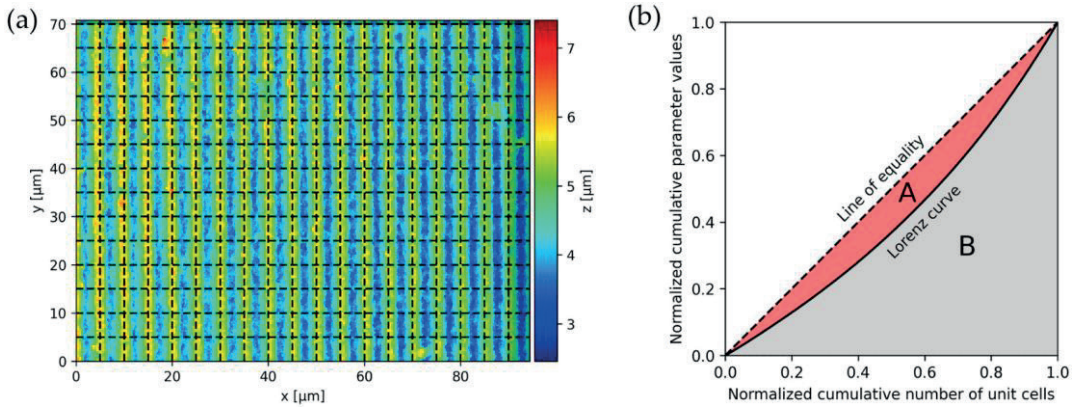


Abb. 1: Konzept des Gini-Koeffizienten, der unter anderem mit *surfalize* ausgewertet werden kann. a) Oberflächentopographie einer linienartigen Struktur, unterteilt in Einheitszellen zur Bestimmung der Strukturhöhe. b) Gini-Koeffizient, dargestellt als Differenz zwischen der „Line of Equality“ und der Lorenzkurve.

Sponsoring

EKSPLA Ltd.

Hersteller von innovativen Femto-, Piko- und Nanosekunden-Lasern. Ein Forschungs- und Entwicklungsteam mit mehr als 33-jähriger Erfahrung garantiert professionelles Laserdesign und die Herstellung von zuverlässigen und hochmodernen Produkten. Eine der Hauptkompetenzen von EKSPLA ist die Fähigkeit, Laser an kundenspezifische Anforderungen anzupassen.

EKSPLA bietet somit optimierte und maßgeschneiderte Lösungen sowohl für Industriekunden mit 24/7 Anforderungen als auch für Anwender im Bereich der Forschung und Entwicklung.

Neben dem Hauptsitz in Vilnius, Litauen, unterhält EKSPLA eigene Niederlassungen in den USA, China und Großbritannien. Darüber hinaus sorgen mehr als 20 Vertretungen weltweit für einen schnellen und zuverlässigen Laserservice und kompetente Beratung.

Auf der Lasertagung in Mittweida präsentiert EKSPLA u. a. seinen neuen Femtosekunden-Laser. FemtoLux 50 ist ein Femtosekundenlaser mit bis zu 50 W für industrielle 24/7 Anwendungen. MHz-, GHz- und MHz+GHz-Burst-Modi, echte Pulse-on-Demand-Fähigkeit sowie 515-nm- und 343-nm-Ausgangsoptionen ermöglichen die Anpassung des Lasers an verschiedene Anwendungen in der Mikrobearbeitung und Materialbearbeitung. FemtoLux 50 zeichnet sich in seiner Leistungsklasse durch ein innovatives Dry Cooling-Kühlsystem aus. Dadurch werden die üblichen Zuverlässigkeitsprobleme der ressourcenintensiven Wasserkühlung gelöst und gleichzeitig die Installation vereinfacht und der Wartungsaufwand reduziert. Das Lasersystem eignet sich für zahlreiche Anwendungen vom Stentschneiden bis zur Halbleiterfertigung und darüber hinaus.

Kontaktdaten:
EKSPLA Ltd. | Savanoriu av. 237 | LT-02300 Vilnius, Litauen
Ansprechpartner: Deividas Andriukaitis |Phone +370-604-53184|E-Mail: d.andriukaitis@ekspla.com
Web: www.eskpla.com

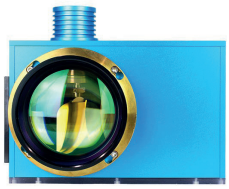
LIM Laserinstitut Mittelsachsen GmbH

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 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 3D Druck von Metall 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 Knowhow 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 12 Mitarbeitern und Vertriebspartnern in China, Südkorea und Japan. Das internationale Team hat eine ausgewiesene Expertise in den Bereichen Lasertechnik, Optik, Mechanik, Digitalelektronik und Programmierung. MOEWE ist ein zuverlässiger Ansprechpartner für hochwertige industrietaugliche Polygonscanner, 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

3D MICROMAC

ACSYS

BLUE
LASERTOOLS

EQ
PHOTONICS
Laser + Optoelektronik

GFH
laser micro machining

HIWIN®

IPG
PHOTONICS

laservision

LASERVORM

OWIS®

PROTECT®
LASERSCHUTZ GMBH

REXAT

SITEC

TRUMPF

TOPAG
Lasertechnik

3D-Micromac AG

Ultrapräzise Lasersysteme für die Mikrobearbeitung der nächsten Generation

Die 3D-Micromac AG ist der führende Spezialist für Lasermikrobearbeitung. Unser Unternehmen entwickelt hochwertige, zuverlässige und benutzerfreundliche Lasersysteme für Anwendungen in der Halbleiter-, Photovoltaik-, Glas- und Displayindustrie, der Mikrodiagnostik sowie der Medizintechnik. Unsere Lösungen steigern die Produktionseffizienz, optimieren Prozesse und senken Kosten.

Mit über 20 Jahren Erfahrung unterstützen wir unsere Kunden als verlässlicher Partner in der Prozessentwicklung, der Lohnfertigung sowie der Entwicklung kundenspezifischer Lasersysteme – mit umfassendem Know-how in der Excimer- und Ultrakurzpulslasertechnologie sowie der Rolle-zu-Rolle-Bearbeitung flexibler Materialien.

Von der Prozessentwicklung über die Systemauswahl bis zur Inbetriebnahme und Serviceleistungen begleiten wir den gesamten Produktlebenszyklus.

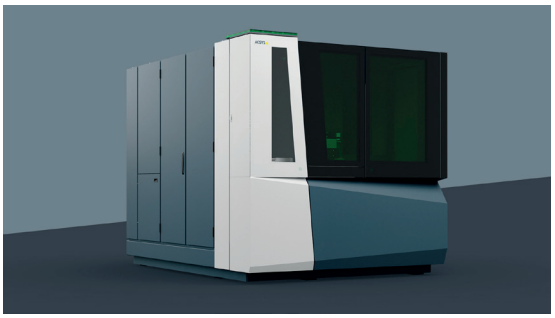
3D-Micromac AG | Technologie-Campus 8 | D-09126 Chemnitz
Tel: +49 371 400 43 222
Web: www.3d-micromac.com
E-Mail: sales@3d-micromac.com

ACSYS Lasertechnik GmbH

ACSYS ist führender Anbieter hochpräziser Standard- und Spezialmaschinen im Bereich Lasertechnik. Mit Pioniergeist, Erfahrung und Know-how entwickelt, fertigt und vertreiben wir als inhabergeführtes, mittelständisches Unternehmen seit 2003 kundenspezifische Lasersysteme in Verbindung mit effizienten Fertigungsprozessen für industrielle Anwendungen. Als technologischer Vorreiter für die Lasermikrobearbeitung ist ACSYS die erste Adresse für hochwertige Lösungen zum Gravieren, Markieren, Strukturieren, Schweißen und Schneiden mittels Lasertechnik. Zuverlässigkeit, Nachhaltigkeit und Qualität „Made in Germany“ sind unser Anspruch. Deshalb lassen wir uns regelmäßig nach den weltweit anerkannten Standards DIN ISO 9001 sowie 14001 zertifizieren.

Was uns antreibt sind Herausforderungen im Bereich hochpräziser Laserbearbeitung. In Verbindung mit dem Know-how von mehr als 120 Mitarbeitenden entstehen an den Standorten Kornwestheim und Mittweida innovative Lasersysteme für unterschiedlichste Anwendungen und Branchen. Unser einzigartiges Know-how für Prozesse, Hardware und Software sowie unsere langjährige Material-, System- und Laserkompetenz haben in den letzten 20 Jahren dazu beigetragen, die Grenzen des Machbaren zugunsten unserer Kunden zu verschieben und kundenspezifische Anforderungen optimal zu erfüllen.

Leipziger Straße 37 | 09648 Mittweida | T: +49 3727 996909 0 | E: info@acsys.de | W: www.acsyslaser.com/



EQ Photonics GmbH

EQ Photonics: Innovativ. Persönlich. Professionell.

Gestalten Sie mit uns die Zukunft der Photonik! Seit über 25 Jahren sind wir Ihr Distributor für hochwertige Komponenten – von Akusto-Optik, LEDs und Lasertechnik bis hin zu High-Power-Lasern die Materialbearbeitung und Machine-Vision-Kameras. Wir verbinden führende Hersteller wie YSL Photonics (Femtosekundenlaser), GW Laser (Faserlaser) und Kern Technologies (CO_2-Laser) mit europäischen Unternehmen aus Wissenschaft, Medizin und Industrie.

Profitieren Sie von langfristigen Partnerschaften, schnellen Entscheidungen und professioneller Unterstützung. Wir hören zu, verstehen Ihre Herausforderungen und liefern maßgeschneiderte Lösungen. EQ Photonics – weil Ihr Erfolg zählt.

👉 Lassen Sie uns über Ihre Anforderungen sprechen!

EQ Photonics GmbH |Zeppelinstr. 4 |85399 Hallbergmoos | Germany
Tel: +49 811 998707 28 | Fax: +49 811 998707 49
www.eqphotonics.de
jihui.song@eqphotonics.de

HIWIN GmbH

Wir bei HIWIN erzeugen und führen Bewegung. Mit unseren Produkten und unserem Mindset. Spezialisiert auf standardisierte und kundenspezifische Produkte der Antriebstechnik, haben wir es uns zur Aufgabe gemacht, für Bewegung den richtigen und effizientesten Weg zu finden. Weltweit. Von der Medizintechnik bis zur Photovoltaik, von der Werkzeugmaschine über Automotive bis zur Batterie: Unser Produktportfolio umfasst neben Kugelgewindetrieben, Profilschienenführungen, Linearachsen, Linearmotoren und Antriebsverstärkern auch komplette Positionier- und Bewegungssysteme. Mit Leidenschaft für Technik und der Liebe zum Detail kombinieren wir Mechanik und Elektronik für die Bewegungslösungen unserer Kunden. Alles aus einer Hand. Wir haben Fertigungsstandorte in Deutschland, Europa und auf der ganzen Welt. Bewegung ist UNSERE Leidenschaft.

HIWIN GmbH | Brücklesbünd 1 |77654 Offenburg
Fon +49 781 93278-0 | Mail info@hiwin.de |Web www.hiwin.de

LASERVORM GmbH

LASERVORM – Von Mittweida in die Welt der industriellen Lasertechnologie

Im Jahr 1994 gründete **Thomas Kimme** die LASERVORM GmbH als Ausgründung aus dem damaligen Laserinstitut der Hochschule Mittweida – mit einer klaren Vision: Lasertechnologie aus der Forschung in die industrielle Anwendung zu überführen.

Schon in den Anfangsjahren leistete LASERVORM **Pionierarbeit in der additiven Fertigung** und gehörte zu den ersten Unternehmen, die formgebendes **Laserauftragschweißen mit Pulverzusatz** industriell einsetzten.

Heute ist LASERVORM ein mittelständisches Familienunternehmen mit rund 70 Mitarbeitenden.

Unsere drei Kompetenzfelder sind:

Lasermaschinenbau – Entwicklung modularer Basismaschinen wie **LV Mini, LV Midi und LV Flex** sowie maßgeschneiderter Sonderlösungen, speziell für Automotive, Maschinenbau und Medizintechnik.

Laserlohnfertigung – Bearbeitung von Einzelteilen bis Großserien per Laserschweißen, -härten und -auftragschweißen – mit dokumentierter Qualitätsprüfung.

Service – Umfassende Betreuung über den gesamten Lebenszyklus: Technologieberatung, Wartung, Schulung und Support.

Wir freuen uns, auch in diesem Jahr wieder Teil der **Lasertagung in Mittweida** zu sein – an dem Ort, an dem unsere Geschichte begann.

LASERVORM GmbH |Suedstr. 8 | 09648 Altmittweida |Tel: 0049 3727 99 74 0

GFH GmbH

Die GFH GmbH ist einer der globalen Marktführer und technologischen Vorreiter in der Konzeption und Konstruktion von hochpräzisen Lasermikrobearbeitungsanlagen mit Ultrakurzpuls-Lasern.

Ein Hauptschwerpunkt liegt dabei auf der stetigen Weiterentwicklung des „Werkzeugs“ Laser, mit dem sich bereits heute ganz unterschiedliche Prozesse vom Schneiden über das Drehen und Bohren bis zum Strukturieren innerhalb geringster Toleranzen und ohne Verschleiß abdecken lassen.

Damit steigert die Lasertechnik von GFH nicht nur die Produktivität in der Serienfertigung, sondern legt auch die Basis für innovative Herstellungsverfahren und zukünftige Fertigungsansprüche.

Zusätzlich bietet das Unternehmen auch die professionelle Auftragsfertigung nach individuellen Kundenwünschen und spezifischen Anforderungsprofilen auf den betriebseigenen Bearbeitungszentren an.

Serien- und Individual-Maschinen aus einer Hand

In Anbetracht der großen Bandbreite unterschiedlicher Fertigungsaufgaben umfasst unser Portfolio an Lasermikrobearbeitungsmaschinen verschiedene Serienlösungen, die sich sehr einfach und effektiv individualisieren lassen. Dadurch erreichen wir kürzeste Lieferzeiten und gewährleisten gleichzeitig optimale Produktionsergebnisse sowie eine hohe Planungssicherheit für unsere Kunden.

Bei sehr speziellen Erfordernissen können wir zudem auf langjährige Erfahrung im Sondermaschinenbau zurückgreifen, um auch im Einzelstück exakt auf den Anforderungskatalog des Kunden zugeschnittene Technik zu realisieren.

Verfahrensschwerpunkte

Der Begriff der Lasermikrobearbeitung umfasst eine große Bandbreite verschiedener Verfahren, die sich zudem stetig erweitert. Unsere Schwerpunkte in diesem Bereich liegen in den Aufgabenfeldern: Mikrobohren, Feinschneiden, Abtragen und Laserdrehen.

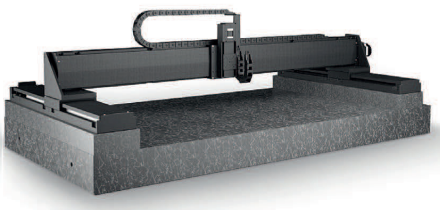
GFH GmbH |Großwalding 5 | 94469 Deggendorf
+49 991 290 92 - 0 | info@gfh-gmbh.de |www.gfh-gmbh.de

Ihr Ansprechpartner vor Ort
Michael Prasser | +49 991 290 92 - 0 | info@gfh-gmbh.de

OWIS GmbH

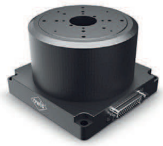
Laser lieben OWIS - nicht ohne Grund. Unser breites Produktportfolio zeichnet sich ganz besonders durch höchste Präzision und Zuverlässigkeit aus. Mit OWIS Engineering und Nähe zu Markt und Anwendung sind wir perfekter Entwicklungspartner für Ihre individuelle Lösung - das gilt auch für spezifische Anforderungen im Reinraum und Vakuum.

Lasermesstechnik



Hochgeschwindigkeits-Laserbearbeitung
Lasermikrobearbeitung

Direktangetriebene Positionierer



OWIS GmbH _ Im Gaisgraben 7 _ 79219 Staufen i. Br. _ Germany

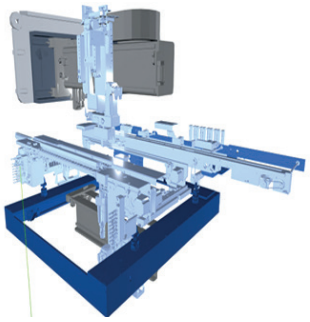
PROTECT Laserschutz GmbH

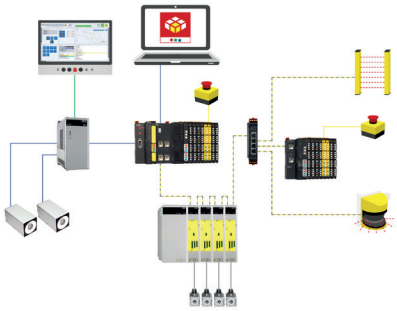
PROTECT-Laserschutz GmbH – seit 2005 Ihr zuverlässiger und qualifizierter Partner rund um Laser-, Schweiß-, und Arbeitsschutz.

Dank der langjährigen Erfahrung besitzen wir ein tiefgreifendes Wissen über Lasertechnik sowie die notwendigen Schutzausrüstungen. Als Hersteller der nach DIN ISO 9001:2015 zertifiziert ist, kennen wir uns insbesondere mit den technischen und Europäische Normen (EN) sowie den gesetzlichen Vorgaben aus, um Ihnen die bestmögliche Sicherheit zu gewährleisten.

In Kooperation mit weltweiten Partnern, wie Universitäten und Forschungsinstituten, entwickelt unser Team an Experten stetig neue Laserschutzprodukte, damit diese die kundenspezifischen Anforderungen erfüllen.

REX Automatisierungstechnik GmbH





Die REX Automatisierungstechnik, ein Mitglied der Eckelmann Gruppe, steht seit mehr als 30 Jahren für Qualität, Innovation, zukunftsweisende Softwareentwicklung und Technologielösungen. Als zuverlässiger Partner des Maschinen- und Anlagenbaus bieten wir die gesamte Bandbreite der Maschinenautomation: von kundenspezifischen Hard- und Softwarelösungen bis zu schlüsselfertigen Automatisierungssystemen.

Als Systemintegrator und Partner für umfassende Automatisierung und Digitalisierung ergänzen wir das Leistungsportfolio unserer Partner und bieten dadurch einen echten Mehrwert.

Darunter zählen folgende Leistungen:

- Hardware Engineering
- Schaltschrankbau
- Softwareentwicklung
- Implementierung von Schnittstellen zur Verwendung von Laserquellen
- Virtuelle Inbetriebnahme mit Digitalem Zwilling
- Bildverarbeitung
- Integration von Sensorik und Messtechnik
- Retrofit von bestehenden Maschinen und Anlagen

REX Automatisierungstechnik GmbH | Fichtenweg 36 | 99098 Erfurt
Fon +49 (0) 36203/9591-0 | vertrieb@rex-at.de

SITEC Industrietechnologie GmbH

SITEC ist ein international agierender 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 im Bereich der E-Mobilität, Medizintechnik oder autarker Speichertechnologien auf Basis von Brennstoffzellen. Zum Portfolio gehören heute vollautomatisierte Laserbearbeitungsanlagen zum Laserschweißen, Laserschneiden, Laserhärten, Laserauftragsschweißen und der Mikrobearbeitung insbesondere für Bauteile im E-Antrieb, Batteriesystem, der Leistungselektronik und für Interior Designs.

Sicherheitskomponenten, wie beschichtete Bremsscheiben, Airbag-Baugruppen und Fahrwerks- Komponenten runden das Leistungsspektrum der Serienfertigung ab. Dank erweiterter Fertigungskapazitäten am Hauptstandort in Chemnitz sowie in Kooperation mit Feintool in Taicang (China) produzieren wir mehrere Millionen Bipolarplatten pro Jahr.

Das 1991 gegründete Unternehmen mit Hauptsitz in Deutschland bedient asiatische Märkte direkt vor Ort über die SITEC Laser Technology (Shanghai) Co., Ltd. und betreibt in den USA (Pittsburgh) einen Showroom.

SITEC Industrietechnologie GmbH | Bornaer Straße 192 | 09114 Chemnitz | Germany
sales@sitec-technology.de , www.sitec-technology.de

TOPAG Lasertechnik GmbH

TOPAG Lasertechnik – Laserexperten für Wissenschaft und Industrie

TOPAG Lasertechnik bietet High-End-Lasertechnologie für anspruchsvolle Anwendungen in Forschung und Industrie.

Das Unternehmen ist in zwei Kernbereichen tätig:

- **Beratung, Vertrieb, Inbetriebnahme und technischer Support** für gepulste Lasersysteme, optische Messtechnik und Präzisionsoptik. TOPAG betreut Kunden aus Labor, Forschung und Industrie und repräsentiert führende internationale Hersteller in Deutschland und Österreich.
- **Eigene Entwicklung und Fertigung von Strahlformungsoptiken,** darunter Top-Hat-Generatoren, diffraktive Strahlteiler und Abschwächer. TOPAG unterstützt Anwender bei der Integration in bestehende optische Setups und entwickelt kundenspezifische optische Systeme auf Basis wellenoptischer Simulationen.

Was TOPAG auszeichnet:

- Ein Team aus Physikern und Ingenieuren mit Erfahrung in Forschung und industrieller Entwicklung – Beratung auf Augenhöhe.
- Ehrliche Empfehlungen, die zur Anwendung passen – mit dem Ziel langfristiger Kundenzufriedenheit.
- Langfristige Betriebssicherheit mit Support und Ersatzteilversorgung über bis zu zehn Jahre – inklusive schneller Reaktionszeiten.

TOPAG – Optimizing Your Laser Setup

TOPAG Lasertechnik GmbH | Nieder-Ramstädter Str. 247 | 64285 Darmstadt | Germany
info@topag.de | +49 6151 429440 | www.topag.de

TRUMPF Laser- und Systemtechnik SE

Zahlen und Fakten zum Hochtechnologieunternehmen TRUMPF

TRUMPF ist einer der Technologie- und Marktführer bei Werkzeugmaschinen für die flexible Blechbearbeitung und bei industriellen Lasern. Mit rund 19.000 Mitarbeitern erwirtschaftete die TRUMPF Gruppe im Geschäftsjahr 2023/24 einen Umsatz von rund 5,2 Milliarden Euro. Werkzeugmaschinen für die Blech- und Rohrbearbeitung bilden das Kerngeschäft. Das Angebot umfasst Maschinen zum Biegen, zum Stanzen, für kombinierte Stanz-Laserprozesse sowie für Laserschneid- und Laserschweißanwendungen. Vielfältige Automatisierungslösungen und ein breites Softwareangebot runden das Portfolio ab. Im Geschäftsbereich Lasertechnik bietet TRUMPF Hochleistungs-CO2-Laser, Scheiben- und Faserlaser, Diodendirektlaser, Ultrakurzpulslaser sowie Beschriftungslaser und -systeme. Auch Lasersysteme für das Schneiden, Schweißen und die Oberflächenbearbeitung dreidimensionaler Teile gehören ebenso zum Produktprogramm wie Hochleistungslasersysteme im Bereich extrem ultravioletten Lichts für die Herstellung von Microchips. Für metallischen 3D-Druck ist TRUMPF mit Kompetenz im Maschinenbau und Wissen über Laser und Digitalisierung bestens aufgestellt.

Kontakt:
Jan Sykora | Vertrieb
Telefon: +49 (7156) 303-37225
E-Mail: Jan.Sykora@trumpf.com