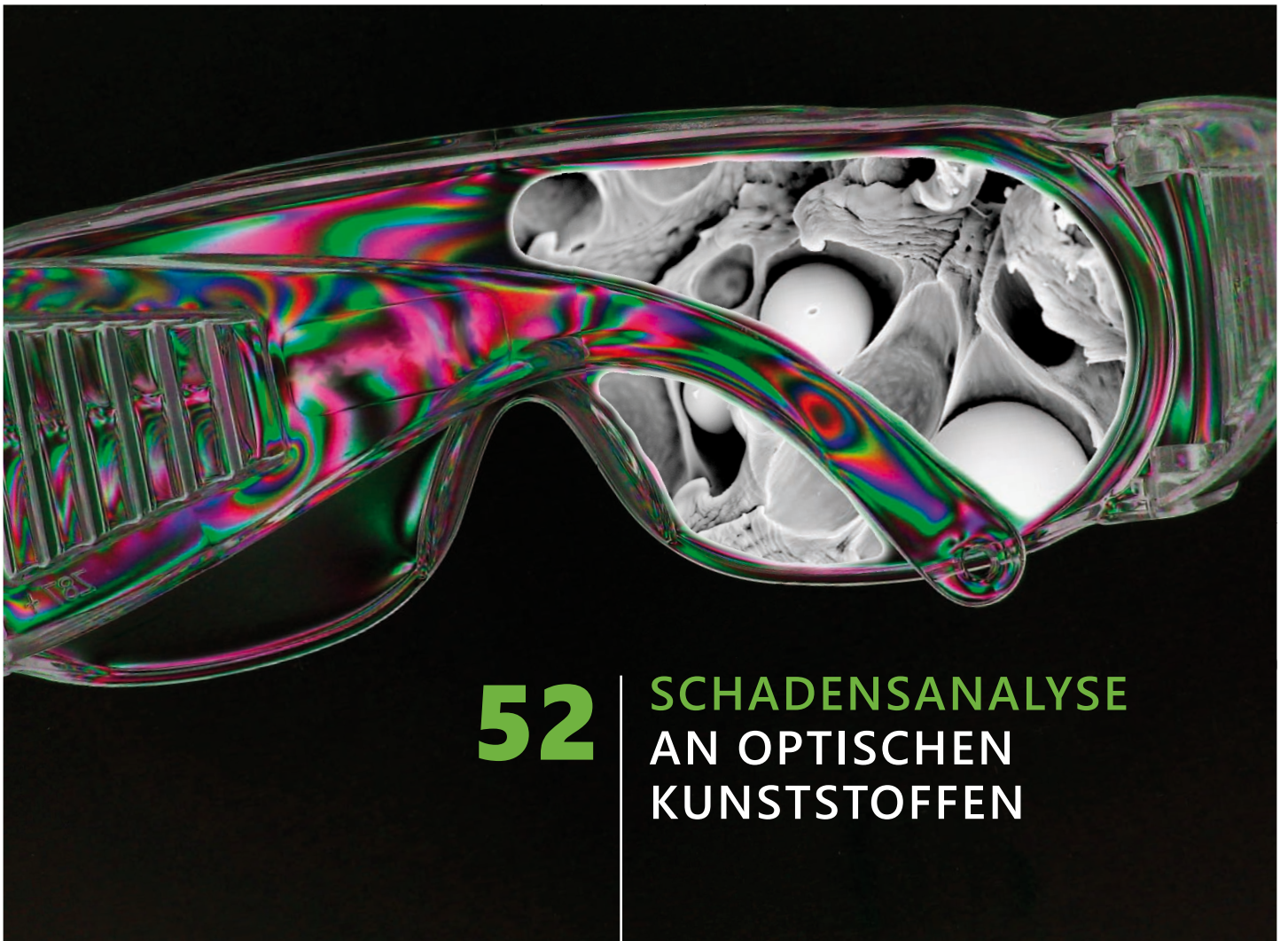


photonics

FLASHLIGHT



52

**SCHADENSANALYSE
AN OPTISCHEN
KUNSTSTOFFEN**

30

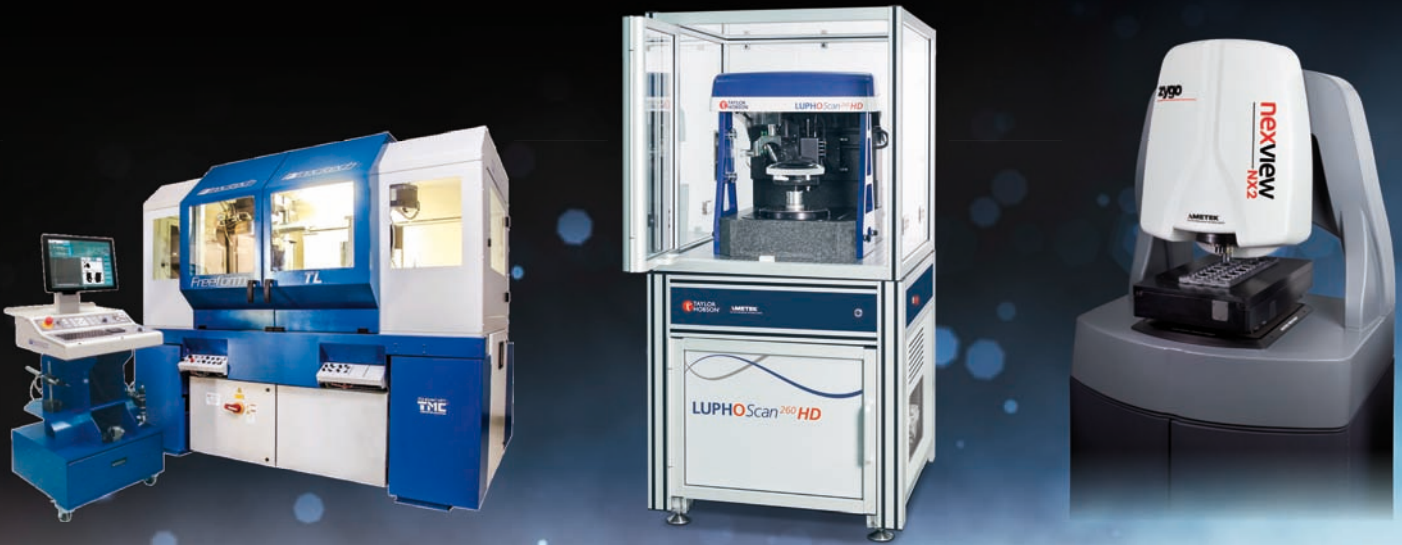
MIKRO GOES MAKRO

Präzision gepaart mit
Produktivität bei der Bearbeitung
mit Ultrakurzpulslasern

46

**REPLIKATION VON ZWEI-
PHOTONEN-LITHOGRAPHIE-
STRUKTUREN**

für die Produktion strukturierter Kunststoff-
mikrooptiken in der Tumordiagnostik



Experten in Optikfertigung und Messtechnik

- Einfache Werkstückeinrichtung dank präziser Messung des Werkzeug-Offsets
- Berührungslose Messtechnik für schnelle und hochgenaue Messung ohne Beschädigung der Oberfläche
- Zuverlässige und vergleichbare Messergebnisse durch abgestimmte Lösungen mit AMETEK Ultrapräzisionstechnologie-Systemen

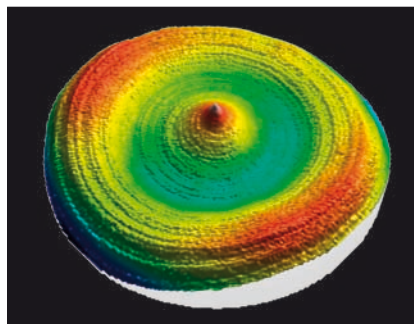
Diamant
Drehen

3D – Form-
messtechnik

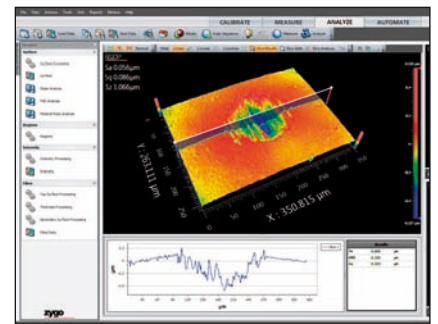
Oberflächen-
messtechnik



Precitech's Nanoform X



Taylor Hobson's LUPHOScan HD



ZYGO's Nexview™ NX2



Thomas Eulenstein
Geschäftsführer
Kunststoff-Institut
Lüdenscheid

Liebe Photonics Flashlight Leserinnen und Leser,

fast zwei Corona-Jahre liegen nun hinter uns und ein wirkliches Ende ist noch nicht in Sicht. Welche langfristigen Folgen die Corona-Pandemie in unserer Gesellschaft hinterlassen wird, lässt sich noch nicht abzuschätzen. Vieles hat sich geändert, weitere Verschiebungen deuten sich an. Das alles verlangt eine Mentalität, die von hochgekrempelten Ärmeln und sprühender Innovationskraft geprägt ist. Woher die Kraft für den Ruck kommen soll? Wenn die Unternehmen nicht selbst aktiv werden, dann werden sie lange warten müssen. Die eigentliche Initialzündung, verbunden mit dem unbedingten Willen zum Erfolg, muss sicherlich aus den Unternehmen selbst kommen, aber Netzwerke wie Optence oder auch das Kunststoff-Institut Lüdenscheid können hier eine wertvolle Hilfe sein. Die letzten beiden Jahre waren auf dadurch geprägt, dass kaum eine Messe stattfinden konnte, umso wichtiger war es, dass die Netzwerkarbeit auch durch Projektangebote forciert wurde und in beiden Jahren die Wetzlarer Herbsttagung erfolgreich und sicher für die Aussteller und Teilnehmer als Branchentreff durchgeführt wurde.

Sowohl die Kunststofftechnik als auch die Photonik werden als Querschnittstechnologien gesehen. Und so groß die Unterschiede der Technologien auch sein mögen, so ähnlich sind die Branchen, Märkte und Kunden. Beide Technologiebereiche sind innovationsgetrieben. Wie antworten Unternehmen auf die zunehmenden Herausforderungen eines sich immer schneller wandelnden Marktes? Wo sind die richtigen Wege für eine individuell zugeschnittene Strategie- und Geschäftsmodellentwicklung?

Die Bedeutung von Innovationen für den wirtschaftlichen Erfolg von kleinen und mittleren Unternehmen ist ebenso unstrittig wie die daraus resultierende Notwendigkeit, auch beim Thema Innovation nichts dem Zufall zu überlassen. Aufgabe des Unternehmers ist es, den Erneuerungsprozess bestmöglich zu steuern, vielleicht bedarf es sogar eines gewaltigen Kraftakts, weil sich die Probleme häufen: Forschungs- und Entwicklungsrückstände gegenüber anderen Standorten auf unserem Globus wollen ausgeglichen, Verzerrungen durch Handelsrestriktionen kompensiert, ökologische Innovationen in die Technologien eingeführt, neue Märkte erschlossen werden.

Auch in dieser Ausgabe finden Sie dazu wieder neben den News aus der Branche Innovationen aus Forschung und Entwicklung sowie Technologien und Applikation und Querschnittsthemen, welche Ihnen einen umfangreichen Überblick, wichtige Impulse und Anstöße für Innovationen geben.

Ich wünsche Ihnen viel Vergnügen beim Lesen des Online Magazins Photonics Flashlight, eine gesegnete Weihnachtszeit und einen guten Start in ein erfolgreiches Jahr 2022.

Thomas Eulenstein
Geschäftsführer
Kunststoff-Institut Lüdenscheid

BRANCHEN-NEWS

- 6** Dr. Ekaterina Golovchenko – Senior Vice President für Technologie und Entwicklung bei Edmund Optics
- 6** LAYERTEC und TRUMPF schließen strategische Partnerschaft für die Displayindustrie
- 7** Optence verleiht Förderpreis für exzellente Masterarbeiten
- 8** Starkes Gefälle bei FuE-Ausgaben in Deutschlands Regionen
- 9** Applied Photonics Award 2021 verliehen
- 9** Ausschreibung des Innovation Award Laser Technology 2022
- 10** Weltpremiere für virtuelles Laserlabor „femtoPro“
- 10** Pulsar Photonics eröffnet neuen Firmenstandort
- 11** Innovative Ultrakurzpulsoptiken von Edmund Optics® und UltraFast Innovations gewinnen Silber beim LFW Innovators Award 2021
- 12** 30 Jahre Trioptics

FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

- 13** Quantenmaterial als Terahertz-Booster – Neue Studie klärt grundlegendes Rätsel um topologische Isolatoren
- 19** Neuer Sensor kann immer kleinere Nanoteilchen erkennen



- 20** Elektrisch schaltbare Nanoantennen als Grundlage für holographische Videotechnologie
- 28** Extrem dünne Kristalle als Laser-Lichtquellen
- 28** Erster topologischer Laser aus vertikalen Resonatoren entwickelt
- 29** Eine stark vereinfachte Methode zur Vorhersage von Quantenwechselwirkungen zwischen Licht und Materie
- 29** Lichtfeld spiegelt die Struktur des vierdimensionalen Raums wider

FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG



Modenkopplung mittels NPR in Yb:CALGO

14

Wirtschaftlichkeit von UKP-Prozessen

22

TECHNOLOGIE UND APPLIKATION

Mikro goes Makro

Präzision gepaart mit Produktivität bei der Bearbeitung mit Ultrakurzpulslasern

30

- 38** Roboter recycelt Batterien
- 39** Mit Hochleistungsschichten zur effektiven Nutzung und Speicherung solarer Energie
- 40** LiDAR und autonome Autos: Keine 08/15-Lösung
- 45** Greifarm aus dem 3D-Drucker für die Optikmontage mit höchster Präzision
- 45** Neues Spiegelteleskop zur Erdbeobachtung bereit für den Flug zur Internationalen Raumstation ISS
- 46** Replikation von Zwei-Photonen-Lithographie-Strukturen für die Produktion strukturierter Kunststoffmikrooptiken in der Tumordiagnostik
- 51** Erweiterte Tiefenschärfe
Fraunhofer-Forschende entwickeln plenoptische High-Speed-Kamera
- 52** Schadensanalyse an optischen Kunststoffen
- 57** Mobiler Unkraut-Killer in der Baumschule

PRODUKTNEUHEITEN

- 58** Lasersicherheit für 3D-Sensoranwendungen
- 58** Finden statt Suchen mit 5G und Echtzeit-Lokalisierung
- 59** 2-Watt-Xenon-Blitzlichtmodul für Point-of-Care-Diagnostik und Umweltanalytik

60 VERANSTALTUNGEN

62 PRODUKT- UND LIEFERANTEN-VERZEICHNIS

68 IMPRESSUM



Dr. Ekaterina Golovchenko – Senior Vice President für Technologie und Entwicklung bei Edmund Optics

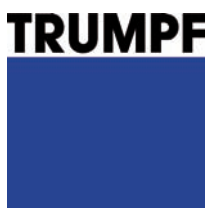
Edmund Optics® (EO) hat kürzlich die Ernennung von Dr. Ekaterina Golovchenko zum Senior Vice President für Technologie und Entwicklung bekannt gegeben. Diese neu geschaffene Position ist Teil einer Reihe technologiebezogener Investitionen, die darauf abzielen, mehr optische Innovationen zu liefern, um die Anforderungen eines zunehmend komplexen Marktes zu erfüllen.

Sie wird für die Weiterentwicklung und Verbesserung der Forschung & Entwicklung sowie der Ingenieurgruppen bei Edmund Optics zuständig sein. Sie wird sicherstellen, dass die technischen Ressourcen und Entwicklungen der Firma gut mit den Produkt- und Fertigungsplänen synchronisiert sind, um die Innovationskraft zu erhöhen. Katya wird auch einem internen Technologie- und Beratungsausschuss vorsitzen, einem Team, das die technologischen Entwicklungsaktivitäten von Edmund Optics priorisiert und überwacht. Katya Golovchenko ist bestens gerüstet, um die Herausforderungen der stetig expandierenden Optikbranche zu meistern. Katya besitzt einen Ph.D. in Physik von der Russischen Akademie der Wissenschaften und war Assistenz-Forschungsprofessorin an der Universität von Maryland. Danach folgte eine beeindruckende Karriere bei AT&T Bell Labs, IPG Photonics und Lumentum. Katya ist außerdem Direktorin bei Optica (ehemals Optical Society of America).

LAYERTEC und TRUMPF schließen strategische Partnerschaft für die Displayindustrie



Der Laseroptikhersteller LAYERTEC und das Hochtechnologieunternehmen TRUMPF schließen eine strategische Partnerschaft und stärken damit ihre Kompetenzen für die Displayindustrie. TRUMPF und LAYERTEC werden den Maschinenpark in einem mehrstufigen Prozess beim Optikspezialisten LAYERTEC in Betrieb nehmen. TRUMPF bringt in die Partnerschaft Maschinen, Werkzeuge und Prozesse ein. LAYERTEC bringt Produktionskompetenz von Optiken ein und stellt damit die Produktion der Großoptiken für die TRUMPF Laseranlagen sicher.



TRUMPF investiert dazu in einen umfangreichen Maschinenpark für die Herstellung von Großoptiken, den das Unternehmen teilweise vom Optikspezialisten Berliner Glas übernommen hat. Solche Großoptiken kommen in den neuesten Laseranlagen von TRUMPF zum Einsatz, die insbesondere für Produktionsverfahren für moderne OLED-Displays ausgelegt sind.

[> Weitere Informationen](#)

Optence verleiht Förderpreis für exzellente Masterarbeiten



Das Photoniknetzwerk Optence hat auf seiner Mitgliederversammlung am 13.12.2021 Förderpreise für zwei Masterarbeiten verliehen.

Andrea Nagel erhielt den Preis für ihre Masterarbeit „Modenkopplung mittels nichtlinearer Polarisationsrotation in Yb:CALGO“, die sie am Photonikzentrum Kaiserslautern anfertigte.

Die zweite prämierte Arbeit „Entwicklung und Untersuchung prozessoptimierter Intensitätsverteilungen für die Lasermikrobearbeitung unter Einsatz eines diffraktiven Strahlformungssystems“ wurde Patrick Mc Kearny von der Hochschule Rhein-Main erstellt.

Prof. Dr. Stephan Naser lobt die Qualität der eingereichten Arbeiten. „Alle eingereichten Arbeiten waren auf einem sehr hohen Niveau. Wir haben uns daher in diesem Jahr entschlossen, den Preis zu teilen und zwei Masterarbeiten auszeichnen“.

> siehe auch Fachartikel



ANZEIGE

OPTIK IST UNSERE ZUKUNFT



LASEROPTIKEN von Edmund Optics®

Edmund Optics® bietet eine Vielzahl optischer Komponenten ideal für Laseranwendungen.

- ✓ **Modernste Messtechnik zur konsequenten Einhaltung der Spezifikationen**
- ✓ **Versandfertige Standardkomponenten & kontinuierliche Erweiterung des Portfolios**
- ✓ **Kundenspezifisches Design & Fertigung bis zur Serienproduktion**
- ✓ **Innovative Partner im Bereich High-End-LIDT-Technologien**

Erfahren Sie mehr über Laseroptiken von EO unter:

www.edmundoptics.de/LO

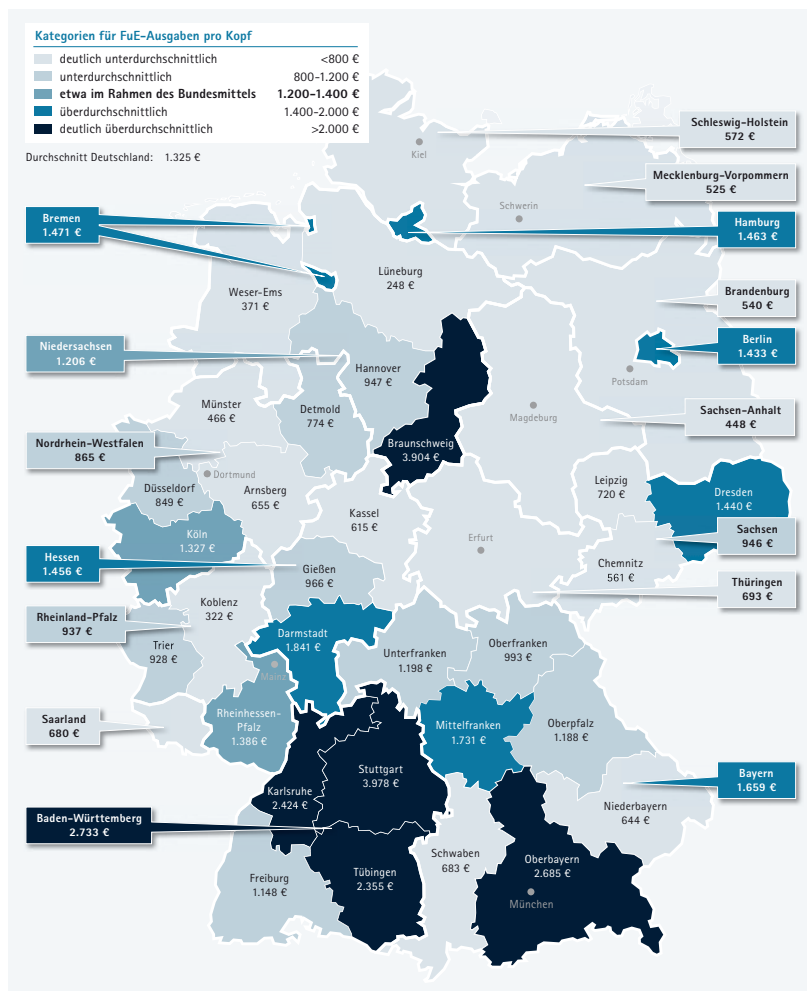
+49 (0) 6131 5700 0
sales@edmundoptics.de



Starkes Gefälle bei FuE-Ausgaben in Deutschlands Regionen

PRO-KOPF-AUSGABEN FÜR FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG IN DEUTSCHLAND

Die regionale Aufteilung folgt den EU-Angaben, die nach sog. NUTS2-Regionen gliedert. In Deutschland ist das die Ebene der Regierungsbezirke bzw. statist. Regionen oder, wo diese Daten nicht vorliegen, die Bundesländerebene.



Angaben für 2019 (jüngste verfügbare Daten)
Stand: Oktober 2021

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Angaben von Stifterverband, Statistisches Bundesamt, Eurostat



ZUSE-GEMEINSCHAFT
FORSCHUNG, DIE ANKOMMT.

Die regionalen Unterschiede bei den FuE-Ausgaben sind immens. Dicht hinter dem Regierungsbezirk Stuttgart mit Pro-Kopf-Ausgaben für Forschung und Entwicklung von knapp 4.000 Euro pro Jahr liegt die Statistische Region Braunschweig – Heimat des Volkswagen-Stammwerks in Wolfsburg – mit FuE-Ausgaben von mehr als 3.900 Euro. Die beiden Regionen bringen es bei den Pro-Kopf-Aufwendungen für FuE damit auf jeweils etwa das Dreifache des Bundesmittels von 1.325 Euro. Es handelt sich um die jüngsten verfügbaren Daten, die die Zuse-Gemeinschaft auf Basis von Angaben des Statistischen Bundesamtes für 2019 ermittelt hat. Am anderen Ende der Skala liegen Regionen in Nord- und Ostdeutschland mit Werten im niedrigen bis mittleren dreistelligen Bereich.

Auch wirtschaftlich relativ starke Gebiete wie z.B. die Statistische Region Hannover – der ehemalige Regierungsbezirk um die Landeshauptstadt – oder die Region Unterfranken liegen mit Werten von rd. 947 Euro bzw. rd. 1.200 Euro pro Kopf unter dem Bundesdurchschnitt bei den FuE-Ausgaben. Gleichzeitig sind jedoch z.B. diese beiden Regionen von Innovationsförderung aus dem erfolgreichen Programm INNO-KOM des Bundeswirtschaftsministeriums ausgeschlossen.

Der Grund: Der Zugang zu INNO-KOM ist an die Strukturförderkulisse der Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur (GRW) gekoppelt.

> Zur Infographik

Applied Photonics Award 2021 verliehen

Sauberes Wasser, die Beseitigung von Weltraumschrott, neue Verfahren für die medizinische Endoskopie und stärkere Laser – auch in diesem Jahr wurden wieder innovative Abschlussarbeiten mit besonderem Bezug zur Photonik mit dem Nachwuchspreis des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, dem »Applied Photonics Award«, ausgezeichnet.

Der Award wurde am 29. September im Rahmen der »Photonics Days Jena« von Nobelpreisträger Prof. Dr. Reinhard Genzel virtuell an die vier Preistragenden übergeben.

> [Weitere Informationen](#)

Ausschreibung des Innovation Award Laser Technology 2022

Herausragende Innovationen im Bereich der Lasertechnik werden mit dem 10.000 Euro dotierten Innovation Award Laser Technology ausgezeichnet. Alle 2 Jahre verleihen der Arbeitskreis Lasertechnik e.V. und das European Laser Institute ELI diesen europäischen Wissenschafts- und Technologiepreis. Einreichungsfrist für Anträge zur laufenden Ausschreibung ist der 17. Januar 2022.

Informationen zur Ausschreibung und zur online-Antragstellung finden BewerberInnen unter der Internetadresse www.innovation-award-laser.org.

Die offizielle Preisverleihung findet im Aachener Rathaus am 4. Mai 2022 im Rahmen des International Laser Technology Congress AKL'22 www.lasercongress.org statt.



INNOVATION AWARD
LASER TECHNOLOGY 2022

Weltpremiere für virtuelles Laserlabor „femtoPro“

Lasers sind allgegenwärtig im täglichen Leben und in der Forschung. Würzburger Wissenschaftler entwickelten nun das Virtual-Reality-Laserlabor „femtoPro“, das komplexe Optikaufbauten in Echtzeit simuliert und ein augensicheres Training der Handhabung von Kurzpuls-Lasern ermöglicht.

In femtoPro tragen Anwenderinnen und Anwender eine Virtual-Reality-Brille (VR-Brille) und bewegen optische Elemente auf einem VR-Lasertisch. So lässt sich die Grob- und Feinpositionierung von Spiegeln, Linsen, Irisblenden oder weiteren Geräten intuitiv und detailgetreu wie im realen Labor verändern. Dabei werden die Eigenschaften und Wirkungen dieser Elemente auf den Laserstrahl nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten in Echtzeit berechnet und dargestellt. Die Schwierigkeit beim VR-Ansatz: Laserstrahlen sind, entgegen landläufiger Meinung, nicht nur „linienförmig“, sondern sie haben einen „gaußförmigen“ Querschnitt, dessen Durchmesser während der Ausbreitung größer und kleiner werden kann. Die Wechselwirkung mit Materie ist zudem hochkomplex und umfasst neben weithin bekannten Phänomenen wie der Lichtbrechung an einem Glas auch die nichtlineare Optik, die zu einer Frequenzumwandlung – also Farbänderung – führt. Daher ist eine genaue Simulation in der Regel sehr zeitaufwändig. Nach zwei Jahren Entwicklungsarbeit wird die erste Version von femtoPro nun bei der Veranstaltung „Highlights der Physik“ in Würzburg erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt.

Zukünftig soll femtoPro nicht nur zur Lehre in Würzburg eingesetzt werden, sondern auch anderen Universitäten oder Schulen zur Verfügung stehen.

[> Weitere Informationen](#)

Pulsar Photonics eröffnet neuen Firmenstandort

In den letzten Jahren ist die Nachfrage nach Lasermaschinen für die Prozesse Laserbohren, -abtragen und -schneiden mit Ultrakurzpulslasern, aber auch mit cw- und QCW-Lasern (Dauerstrich- und Quasi-Dauerstrich-Laser) stark gestiegen. Besonders groß war dabei der Bedarf nach automatisierten Produktionslösungen für die Lasermikrobearbeitung aus den Industriebereichen Elektronik, Medizintechnik und Verfahrenstechnik. Mit dem zweiten Werk in Aachen-Verlautenheid baut Pulsar Photonics seine Fertigungskapazitäten für diese Nachfrage im Bereich des Laser-Anlagenbaus gezielt aus.

[> Weitere Informationen](#)

Innovative Ultrakurzpulsoptiken von Edmund Optics® und UltraFast Innovations gewinnen Silber beim LFW Innovators Award 2021

Zwei innovative Ultrakurzpuls-Produkte von Edmund Optics® und UltraFast Innovations (UFI) gehören zu den Gewinnern des Laser Focus World (LFW) Innovators Award 2021. Die Ultrakurzpulsspiegel mit geringem thermischem Linseneffekt und die gechirpten, komplementären Ultrabreitband-Spiegelpaare haben beide den Preis in Silber gewonnen. Die Gewinner des LFW Innovators Award werden für die innovativsten Produkte und Lösungen in der industriellen Bildverarbeitung ausgezeichnet und durch eine Expertenjury gewählt.

Die Ultrakurzpulsspiegel mit geringem thermischem Linseneffekt ermöglichen Entwicklern

von Ultrakurzpulslasern den Aufbau von Lasern mit hoher Leistung ohne die negativen Einflüsse, die aus dem thermischen Linseneffekt resultieren. Integratoren von Ultrakurzpulssystemen können somit auf stabilere Laser mit höherer Leistung zurückgreifen und effektivere Lösungen für Anwendungen wie Materialbearbeitung, medizinische Laser, nichtlineare Bildgebung und Mikroskopie entwickeln.



ANZEIGE

Sie sind auf der Suche nach einer praxisnahen, spannenden und hochqualitativen Weiterbildung im Bereich Laserschutz?

Bei uns erwartet Sie Know-How direkt von einem der international führenden Laser-Spezialisten in Medizin, Biotechnologie und Industrie.

Mit über 20 Jahren Erfahrung mit Schulungen für Laserschutzbeauftragte gemäß den jeweils aktuellen gesetzlichen Vorschriften können wir individuell auf Ihre Anwendung eingehen – ob online oder vor Ort in unserem modernen Omicron TechCamp bei Frankfurt am Main.

Sie haben noch Fragen?
Unser Team freut sich auf Sie.

Tel.: +49 (0)6106 8224 0
Mail: sales@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de



30 Jahre TRIOPTICS



Am 1. Dezember 2021 feiert der optische Messtechnik-Spezialist TRIOPTICS sein 30-jähriges Firmenjubiläum. Das Unternehmen mit Hauptsitz in Wedel bei Hamburg ist eines der weltweit führenden Unternehmen im Bereich der optischen Mess- und Fertigungstechnik mit Niederlassungen und Vertriebspartnern auf der ganzen Welt. Die Produkte und Systeme von TRIOPTICS begleiten und verbessern weltweit die Entwicklung, Produktion und Qualitätskontrolle von optischen Komponenten, Linsen, Kamera- und Sensorsystemen.

Angetrieben von der Idee den Bereich der computergesteuerten optischen Messtechnik maßgeblich weiterzuentwickeln und anzuführen, gründet Eugen Dumitrescu am 1. Dezember 1991 in Wedel mit zwei Partnern TRIOPTICS. Dabei liegt der Schwerpunkt immer auf der kundennahen Entwicklung optischer Mess- und später auch Fertigungssysteme.

2018 bezieht das Unternehmen seinen neuen Firmensitz in Wedel nur wenige 100 Meter von der Gründungsadresse entfernt. Inzwischen

arbeiten ca. 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter weltweit für den Erfolg von TRIOPTICS. Gestärkt durch die Integration 2020 in den Photonik-Konzern Jenoptik, ist TRIOPTICS auch weiterhin auf Wachstumskurs und arbeitet bereits heute an den optischen Herausforderungen von morgen.

[> Weitere Informationen](#)



Quantenmaterial als Terahertz-Booster

Neue Studie klärt grundlegendes Rätsel um topologische Isolatoren

Sie gelten als hochinteressante Materialien für die Elektronik der Zukunft: Topologische Isolatoren leiten Strom auf eine besondere Weise und versprechen neuartige Schaltkreise und einen schnelleren Mobilfunk.

Ein Forschungsteam aus Deutschland, Spanien und Russland hat nun unter Federführung des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf (HZDR) eine grundlegende Eigenschaft der neuen Werkstoffklasse enträtselt: Wie im Detail reagieren die Elektronen im Material, wenn sie mit kurzen Pulsen sogenannter Terahertz-Strahlung „aufgeschreckt“ werden?

Die Resultate sind nicht nur für das fundamentale Verständnis dieser neuartigen Quantenmaterialien wichtig, sondern könnten künftig für eine schnellere mobile Datenkommunikation sorgen oder in hochempfindlichen Detektorsystemen für die Erkundung ferner Welten eingesetzt werden, wie das Team im Fachjournal NPJ Quantum Materials berichtet.

Damit könnten die neuen Quantenmaterialien in einem deutlich breiteren Frequenzbereich eingesetzt werden als etwa Graphen.

> [Weitere Informationen](#)

Modenkopplung mittels NPR in Yb:CALGO



Pulse im fs-Bereich sind aufgrund ihrer hohen Spitzenleistungen und gleichzeitig kurzen Wechselwirkungszeiten mit zu untersuchenden oder zu bearbeitenden Materialien sowohl für die Forschung interessant, als auch ein wesentliches Werkzeug in vielen industriellen Fertigungsprozessen. Es wird hierbei nicht nur die Entwicklung von neuen experimentellen Methoden zur Pulserzeugung vorangetrieben, sondern auch die Einführung neuer Lasermaterialien.

In der Diplomarbeit „Modenkopplung mittels nicht-linearer Polarisationsrotation (NPR) in Yb:CALGO“, welche für den Optence Förderpreis ausgewählt wurde, wird die Erzeugung ultrakurzer Pulse durch passive Modenkopplung des aktiven Mediums $\text{Yb}^{3+}:\text{CaGdAlO}_4$ (Yb:CALGO) untersucht.

Autorin:

Andrea Nagel

Photonik-Zentrum Kaiserslautern e.V.

Grundlagen, Herausforderungen und Ziele

Yb:CALGO zeichnet sich durch gute thermische Eigenschaften [1,2] und ein flaches, etwa 50 nm breites Emissionsspektrum aus [3]. Das Verstärkungsspektrum von Yb:CALGO bei Raumtemperatur (siehe blaue Kurve, Abb. 1) ist hierbei einer Überlagerung zweier Teilspektren, welche aus zwei möglichen kristallografischen Umgebungen der Dotierungionen in der Wirtskristallmatrix resultieren [4]. Die beiden Teilspektren konnten bei geringen Temperaturen von 10 K in [3] getrennt werden (siehe Abb. 1).

Für die Modenkopplung von Yb:CALGO wurde die nichtlineare Polarisationsrotation (NPR) verwendet. Bei diesem Verfahren werden Resonator intern zwei LBO-Kristalle verwendet, um eine intensitätsabhängige Polarisationsrotation durch phasenfehlangepasste, nichtlineare Typ I SHG-Prozesse zu erzielen [5]. Die Polarisationsrotation wird an Dünnschichtpolarisatoren in intensitätsabhängige Verluste umgewandelt, sodass der Puls- gegenüber dem cw-Betrieb bevorzugt wird. Im Gegensatz zur Kerr-Linsen- und der SESAM-Modenkopplung bietet die NPR-Modenkopplung den Vorteil hoher erreichbarer Modulationstiefen [6] und der intrinsischen Dispersionskompensation [5].

Die Herausforderung der Erzeugung von fs-Pulsen in einem Yb:CALGO-Laser mittels NPR bestand dabei hauptsächlich im Verständnis und der Kontrolle der zugrunde liegenden Effekte: Die Selbstphasenmodulation, spektrale Akzeptanzbandbreite, Gruppengeschwindigkeitsdispersion, Gruppengeschwindigkeitsverzögerung und die polarisationsabhängigen Resonatorverluste weisen alle unterschiedliche Abhängigkeiten von der Wellenlänge und den Temperaturen der nichtlinearen Kristalle auf [5]. Ziel des Projektes war die Erarbeitung eines theoretischen Verständnisses für die komplexe Interaktion dieser Effekte mit dem zusammen-

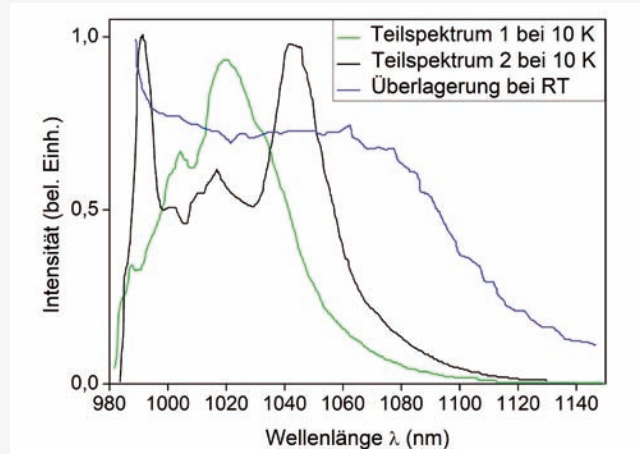


Abb. 1: Fluoreszenzspektrum von Yb:CALGO bei Raumtemperatur (RT, blaue Kurve) und Teilspektren bei 10 K (grüne/schwarze Kurve), gemessen in [3]

gesetzten und stark inhomogen verbreiterten Yb:CALGO-Spektrum in Übereinstimmung mit der experimentellen Umsetzung.

Erste Ergebnisse und Charakterisierung des Pulsbetriebs

Hierzu wurde zunächst ein experimenteller Aufbau iterativ optimiert, sodass in ersten Einzelmessungen Pulse mit einer Dauer von 165 fs bei einer mittleren Ausgangsleistung von 1,12 W und 140 fs Pulse mit einer mittleren Ausgangsleistung von 0,5 W erreicht werden konnten. Eine vollständige Charakterisierung des gepulsten Betriebs mit Messungen des Autokorrelationssignals, des Pulsspektrums, des Radiofrequenzspektrums und der zeitlich und spektral linearen Phase mittels eines GRENOUILLE ist exemplarisch für eine Pulsdauer von 159 fs in Abb. 2 gezeigt. Mit einer spektralen Halbwertsbreite von 7,4 nm und einem Zeit-Bandbreite-Produkt von 0,334 sind die Pulse nahezu fourierlimitiert (6 % Abweichung vom Fourier-Limit von 0,315 für sech^2 -Pulse).

Ausgehend von der prinzipiellen Umsetzbarkeit der Modenkopplung von Yb:CALGO mittels NPR, wurde die gezielte Einflussnahme auf die Pulsparameter im laufenden Betrieb durch die oben genannten Effekte untersucht.

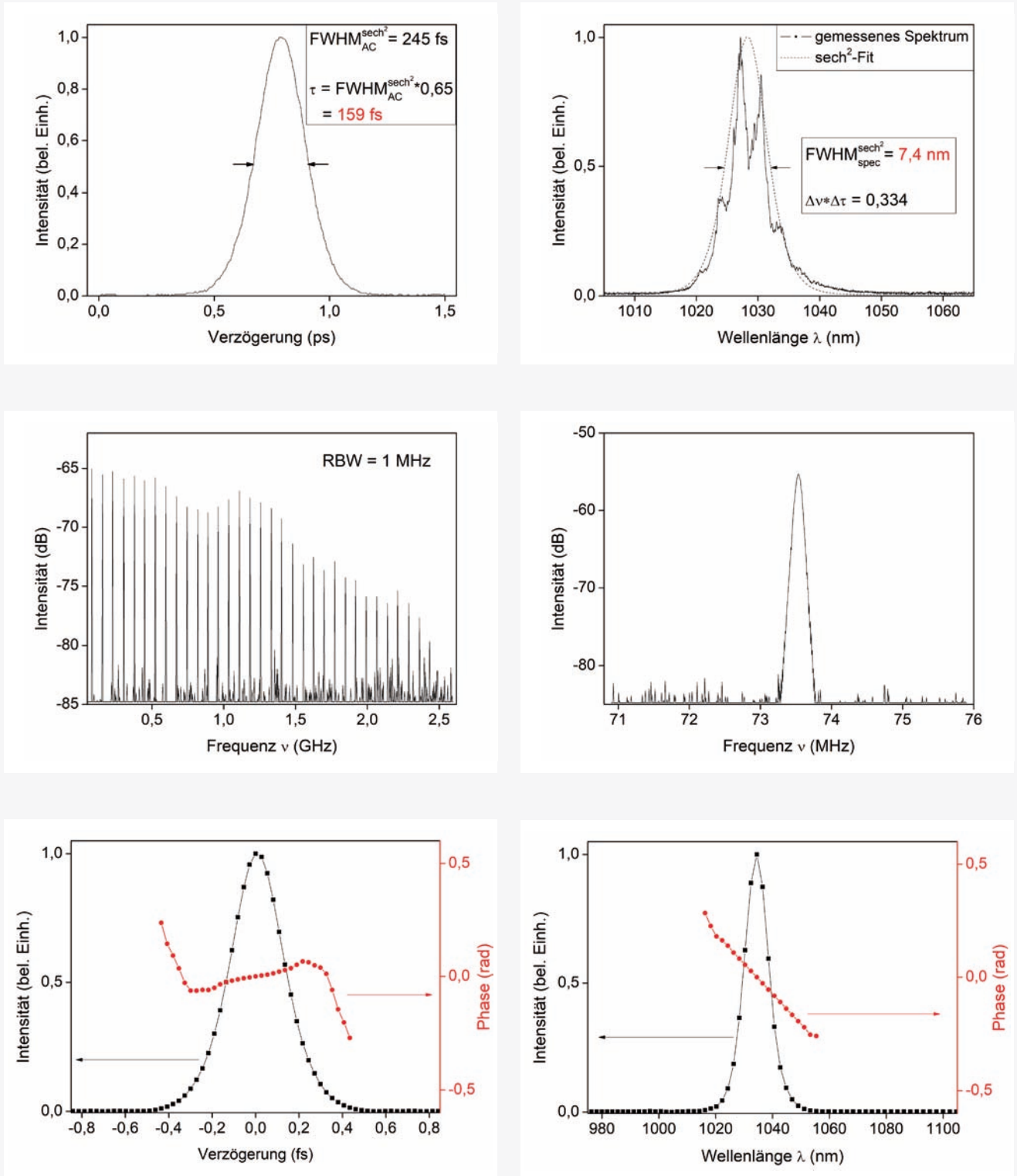


Abb. 2: Autokorrelationssignal (links oben), Pulsspektrum mit $sech^2$ -Fit (rechts oben), Radiofrequenzspektrum des phasenstarr gekoppelten Modenkamms (Mitte links) und der Grundmode (Mitte rechts) und zeitliches (unten links) und spektrales (unten rechts) GRENOUILLE-Signal mit entsprechender Phase (jeweils rote Kurve)

Einstellen der Pulsparameter im laufenden Betrieb

Die Temperaturen der nichtlinearen Kristalle stellen die entscheidenden Kontrollparameter der NPR dar:

Eine Variation der Pulsparameter kann einerseits über den Einfluss auf das unterstützte Spektrum durch die temperaturabhängigen Resonatorverluste oder die Veränderung der spektralen Akzeptanzbandbreite der NPR-Modenkopplung erreicht werden (lineare Verluste). Die linearen Verluste werden dabei aufgrund der linearen Phasendifferenz bei der Propagation durch die LBO-Kristalle hauptsächlich durch deren Temperaturunterschied beeinflusst. Eine optimale Temperaturdifferenz von ca. 90 °C für ein möglichst breites Pulsspektrum konnte in Übereinstimmung mit theoretischen Überlegungen experimentell bestimmt werden. Ein nichtlinearer Beitrag zur Kontrolle der Pulsdauer erfolgt durch den temperaturabhängigen SHG-Prozess, der die Stärke der Selbstphasenmodulation der Pulse beeinflusst. Für Temperaturen nahe der Phasenanpassung von LBO steigt der Betrag des negativen Koeffizienten der Selbstphasenmodulation an, sodass bei konstanter Dispersion im Resonator (hauptsächlich durch die drei Kristalle: Laserkristall, zwei LBO-Kristalle) eine vollständige Dispersionskompensation oder sogar eine Überkompensation erreicht werden kann [5]. Die Gruppengeschwindigkeitsverzögerung bei den im Experiment gewählten Temperaturen konnte durch theoretische Berechnungen zum Auseinanderlaufen von Pulsen unterschiedlicher Polarisationsanteile (linearer Anteil) oder Zentralwellenlänge (nichtlinearer Anteil) als beschränkender Faktor ausgeschlossen werden. Eine systematische Beeinflussung der Pulsparameter ist damit durch relative und absolute Temperatureinstellungen der Kristalle möglich, was einen entscheidenden Vorteil NPR-modengekoppelter Laser darstellt. In herkömmlichen

Systemen wären hierfür aufwändige Umbauten, spezielle Optiken (z.B. GTI-Spiegel) oder zusätzliche, Resonator externe Komponenten wie z.B. aufwändige Stretcher-Kompressor-Einheiten notwendig.

Die erreichbaren Grenzen für Pulsdauer, -spektrum und Ausgangsleistung des Yb:CALGO-Systems konnten somit bei optimalem Temperaturunterschied der Kristalle durch gezielte Einstellungen für die Kristalltemperaturen relativ zur Phasenanpassung untersucht werden. Unabhängig von den LBO-Kristalltemperaturen, der Akzeptanzbandbreite des Modenkopplungsverfahrens oder der Selbstphasenmodulation war das Pulsspektrum jedoch systematisch auf einen Bereich um 1030 nm lokalisiert und auf eine Fußpunktsbreite von etwa 20 nm beschränkt. Bei geringen Modulationstiefen konnte im Spektrum ein modengekoppelter Anteil und ein cw-Durchbruch beobachtet werden, welche stets einen ca. 20 nm großen Abstand voneinander hatten (siehe rote Kurve, Abb. 3). Dies ist eine Beobachtung, welche spezifisch aus der Kombination von NPR-Modenkopplung und dem zusammengesetzten Yb:CALGO-Verstärkungsspektrum resultiert. Die Modenkopplung und der cw-Durchbruch stimmen dabei jeweils mit einem Maximum der Verstärkung einer der

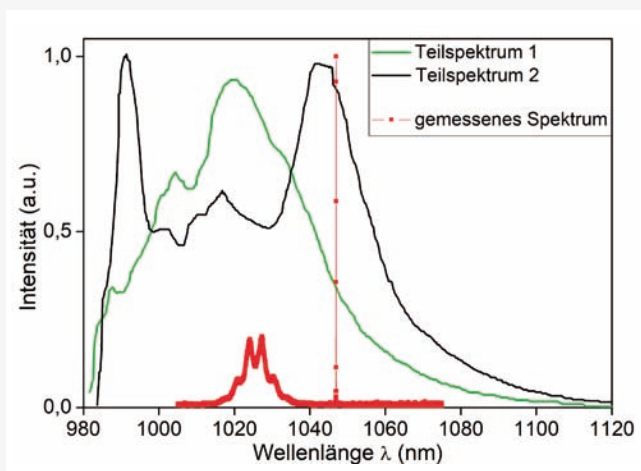


Abb. 3: Gemessenes Spektrum mit cw-Durchbruch (rote Kurve) im Vergleich mit den beiden Yb:CALGO-Teilspektren aus [3]

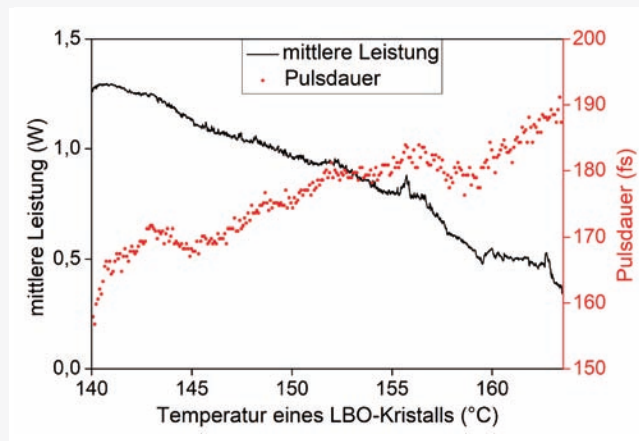


Abb. 4: Messung der Pulsdauer und mittlere Ausgangsleistung beim kontinuierlichen Durchstimmen der LBO-Kristalltemperaturen

beiden Teilspektren überein. Die Modenkopplung ist damit auf eines der beiden Teilspektren beschränkt. Bei NPR-modengekoppelten Vorgängersystemen mit Yb:YAG oder Nd:YVO4 [6] als aktives Medium konnte ähnliches nicht beobachtet werden.

Zusätzlich zu diesen spektralen Eigenschaften konnte die bei der NPR-Modenkopplung intrinsisch mögliche Einflussnahme auf den Pulsbetrieb nachgewiesen werden: Beim Durchstimmen der Kristalltemperaturen relativ zur Phasen Anpassung konnte die Pulsdauer im laufenden Pulsbetrieb durchgängig von 155 fs

Andrea Nagel
 Photonik-Zentrum Kaiserslautern e.V.
 Kohlenhofstraße 10
 67663 Kaiserslautern
 Telefon: +49 631 415 575 16
 E-Mail: andrea.nagel@pzk.de

bis 190 fs bei mittleren Ausgangsleistungen von 1,3 W bis 0,4 W direkt aus dem Oszillator variiert werden (siehe Abb. 4). Die Strahlqualität für das System war dabei mit $M^2 < 1,1$ stets sehr gut und es wurde eine maximale Modulationstiefe von 14% erreicht. Die größte mittlere Ausgangsleistung, die im reinen modengekoppelten Betrieb im Verlauf der Experimente erzielt werden konnte, betrug 1,75 W, was bei einer Repetitionsrate von ca. 70 MHz einer Pulsenergie von 25 nJ entspricht.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Diplomarbeit konnte demnach ein diodengepumpter Yb:CALGO Festkörperlaser aufgebaut werden, der mittels NPR-Modenkopplung die Erzeugung von Pulsen mit einer Dauer < 200 fs erlaubt. Die der NPR zugrundeliegenden Effekte konnten durch ein theoretisches Verständnis experimentell gezielt eingesetzt werden, um lineare und nichtlineare Beiträge zur Kontrolle des Pulsbetriebs zu nutzen. Dadurch konnten im beobachteten Bereich der durchgängig einstellbaren Pulsdauern im rein gepulsten Betrieb mittlere Ausgangsleistungen im W-Bereich erzielt werden. In folgenden Arbeiten gilt es auf Basis der erarbeiteten Erkenntnisse eine Aufhebung der spektralen Beschränkung und Leistungsskalierungen zu ermöglichen, um die gezeigten Vorteile der NPR noch effizienter nutzen zu können.

Quellen

[1] Loiko, Pavel, Frederic Druon, Patrick Georges, Bruno Viana und Konstantin Yumashev: Thermo-optic characterization of Yb:CaGdAlO4 laser crystal. Opt. Mater. Express, 4(11):2241-2249, Nov 2014.
 [2] Petit, Johan, Philippe Goldner und Bruno Viana: Laser emission with low quantum defect in Yb:CaGdAlO4. Opt. Lett., 30(11):1345-1347, Jun 2005.
 [3] Boudeille, J., F. Druon, M. Hanna, P. Georges, Y. Zaouter, E. Cormier, J. Petit, P. Goldner und B. Viana: Continuous-wave and femtosecond laser operation of Yb:CaGdAlO4 under high-power diode pumping. Opt. Lett., 32(14):1962-1964, Jul 2007.
 [4] Petit, Johan: Monocristaux dopés ytterbium et matériaux assemblés pour lasers de fortes puissances. Doktorarbeit, Université Pierre et Marie Curie, 2006.
 [5] Fries, C.: Neuartige Konzepte für die Impulserzeugung basierend auf Yb:YAG Hochleistungsoszillatoren. Doktorarbeit, sierre Verlag, Universität Kaiserslautern D386, 2018.
 [6] C. Schäfer, C. Fries, C. Theobald, and J. A. L'huillier, Opt. Lett. 38, 160 (2013).

Danksagung

Mein Dank geht an die Mitarbeiter der GWU-Lasertechnik Vertriebsges. mbH für die Unterstützung mit dem GRENOUILLE.

Abschließend möchte ich mich vielmals für die Verleihung des Optence Förderpreises bedanken.

NEUER SENSOR kann immer kleinere Nanoteilchen erkennen



Nanoteilchen sind in unserer Umgebung allgegenwärtig: Viren in der Raumluft, Proteine im Körper, als Bausteine neuer Materialien etwa für die Elektronik oder in Oberflächenbeschichtungen. Wer die winzigen Partikel sichtbar machen will, hat ein Problem: Sie sind so klein, dass man sie unter einem optischen Mikroskop meist nicht sieht. Forschende am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) haben einen Sensor entwickelt, mit dem sie Nanoteilchen nicht nur aufspüren, sondern auch ihre Beschaffenheit bestimmen und ihre räumliche Bewegung nachverfolgen können.

Gängige Mikroskope erzeugen stark vergrößerte Bilder von kleinen Strukturen oder Objekten mit Hilfe von Licht. Weil die Nanoteilchen aufgrund ihrer Winzigkeit aber kaum Licht absorbieren oder streuen, bleiben sie unsichtbar. Optische Resonatoren hingegen verstärken die Wechselwirkung zwischen Licht und Nanoteilchen: Sie halten Licht auf kleinem Raum gefangen, indem es tausende Male zwischen zwei Spiegeln reflektiert wird. Befindet sich ein Nanoteilchen in dem gefangenen Lichtfeld, dann wechselwirkt das Nanoteilchen tausende Male mit dem Licht, so dass die Änderung der Lichtintensität messbar wird.

Einsatzmöglichkeiten für ihren Resonator sehen die Forschenden bei der zukünftigen Detektion der dreidimensionalen Bewegung mit hoher zeitlicher Auflösung und der Charakterisierung der optischen Eigenschaften von biologischen Nanoteilchen, wie zum Beispiel Proteinen, DNA-Origami oder Viren. Der Sensor könnte damit Einblicke in noch nicht verstandene biologische Vorgänge ermöglichen.

Ihren neuartigen Fabry-Pérot Resonator präsentieren sie in der Zeitschrift Nature Communications (DOI: 10.1038/s41467-021-26719-5).

[> Weitere Informationen](#)



Universität
Stuttgart



Bildquelle: Julian Karst, Universität Stuttgart / PI 4

Elektrisch schaltbare Nanoantennen als Grundlage für holographische Videotechnologie

Forschende der Universität Stuttgart haben einen völlig neuen Ansatz für holografische Displays eingeführt, der auf elektrisch schaltbaren plasmonischen Nanoantennen aus Polymeren basiert. Er ist der Schlüsselbaustein, um bewegte Hologramme in Echtzeit zu realisieren, die virtuelle Diskussionen am runden Tisch ermöglichen sollen.



Online-Meeting der Zukunft:
Die Teilnehmerin rechts erkennt mittels einer VR/AR Brille die virtuell anwesende Vortragende links als realistisches Hologramm.

Pixeln mit den üblichen Flüssigkristallen nicht mehr funktioniert.

Forschende der Universität Stuttgart haben diese fundamentale Barriere in einer interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Physik und Chemie jetzt erstmals durchbrochen und einen komplett neuen Ansatz für holographische Displays eingeführt. Sie haben dazu elektrisch schaltbare, nur wenige hundert Nanometer große metallische Nanoantennen auf Basis von leitfähigen Polymeren entwickelt. Das Besondere daran: Bei Spannungen zwischen plus und minus 1 Volt in einem Elektrolyten schalten die optischen Eigenschaften des Materials zwischen metallisch reflektierend und glasartig durchsichtig hin und her, und das mit Videoraten von 30 Hertz. Die Nanoantennen sind weniger als 400 Nanometer (also 0.4 Mikrometer) groß und nur wenige zehn Nanometer dick, erfüllen jedoch trotzdem dieselben Aufgaben wie die viel größeren und dickeren Flüssigkristalle. Damit erreichen sie bereits jetzt Pixeldichten von den geforderten 50 000 dpi.

> [Weitere Informationen](#)

Hologramme als eindrucksvolle dreidimensionale Standbilder sind vielen bekannt. Bewegte Hologramme, gar in Echtzeit, mit Daten aus einem Hochgeschwindigkeits-Internet, gibt es bisher jedoch nicht. Der begrenzende Faktor dafür ist die Auflösung der Displays: Holographische Bilder erfordern eine Auflösung von 50.000 dpi (Pixeln pro Inch) – 100-mal mehr, als die besten Smartphone-Displays derzeit leisten. Für eine solche Auflösung müsste man die Pixelgröße auf einen halben Mikrometer verkleinern. Dies ist jedoch nicht möglich, da die Ansteuerung der Graustufen zwischen „schwarz“ und „weiß“ über die Spannung bei so schmalen

Originalpublikation:

„Electrically switchable metallic polymer nanoantennas“,
Julian Karst et al., SCIENCE vom 29.10.2021,
Science 374, Issue 6567, pp. 612-616 (2021).

Wirtschaftlichkeit von **UKP-Prozessen**



Autor:

Patrick Mc Kearny
Hochschule Rhein-Main

Die Entwicklung des Ultrakurzpulslasers (UKP-Laser) ermöglicht neue, bisher ungekannte Möglichkeiten in der Mikroproduktion. Durch die kurze Wechselwirkungszeit von Licht und Materie kann die Wärmediffusion in das Werkstück vernachlässigt werden und der thermische Energieeintrag wird stark lokalisiert [1]. Bei Pulslängen im Piko- und Femtosekundenbereich sublimiert das zu bearbeitende Material unmittelbar und es kommt zur sogenannten schmelzfreien Ablation. Zudem führen die hohen Spitzenintensitäten zu nicht-linearen Absorptionsprozessen, die die Bearbeitung von bei der gewählten Laserwellenlänge transparenten Materialien wie Gläsern und Halbleitern, aber auch Keramiken und Verbundwerkstoffen ermöglichen [2].

Im Vergleich zu Verfahren mit Nanosekundenlasern ist bei UKP-Lasern die Ablation pro Laserleistung deutlich geringer [3]. Die Bearbeitung mit UKP-Lasern beruht auf anderen Ablationsmechanismen, bei denen die hohe Lokalisierung der Energie eine hohe Bearbeitungsqualität ermöglicht. Jedoch wird dadurch die Abtragsrate verringert. Diese, sowie die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten eines solchen Systems, machen den Einsatz von UKP-Lasern unwirtschaftlich. Da der Preis pro Watt Laserleistung mit steigender mittlerer Leistung deutlich sinkt, ist eine Erhöhung der nutzbaren mittleren Leistung notwendig, um den

Einsatz von UKP-Lasern in der Industrie wirtschaftlicher zu gestalten. [4]

Die maximale Ablationsrate verhält sich in einem idealisierten Modell proportional zur mittleren Leistung [5]. Bei der UKP-Bearbeitung mit hohen mittleren Leistungen kommt es zu qualitätsmindernden Effekten. Dazu zählt die Wärmeakkumulation, die durch Vergrößerung der Wärmeeinflusszone zu schmelzdominiertem Abtrag führt. Darüber hinaus kommt es zur selbstorganisierten Strukturbildung, wie beispielsweise Cone-Like-Protrusions (CLPs). Somit kann die Leistung nicht beliebig erhöht werden, sondern muss dem jeweiligen Prozess angepasst werden. Für die effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden mittleren Leistung und somit der Erhöhung der Ablationsrate, müssen Prozesse entwickelt werden, bei denen die Energieeinkopplung optimiert ist. [4]

Zur Erhöhung der mittleren Laserleistung und somit der Abtragsrate in UKP-Prozessen setzt die Pulsar Photonics GmbH in der optischen Systemtechnik auf einen Galvanometerscanner, welcher den fokussierten Strahl auf dem Werkstück bewegt, sowie einem „Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulator“ (LCoS-SLM), welcher die Intensitätsverteilung nach Bedarf formt. Die Strahlform kann für den jeweiligen Prozess optimiert werden und durch die Erzeugung von Multispotverteilungen können einzelne Bearbeitungsschritte parallelisiert werden.

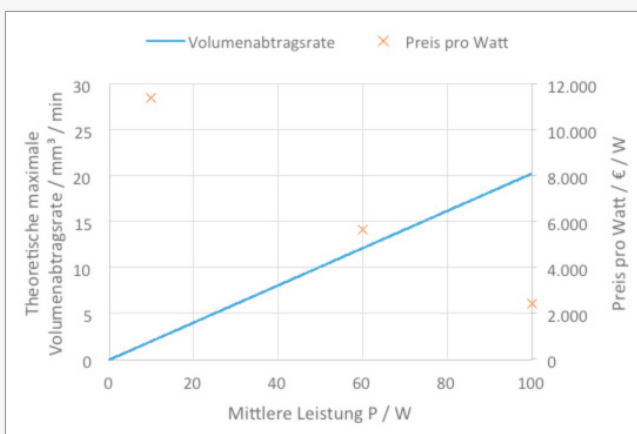


Abbildung 1: Abhängigkeit der maximalen Volumenabtragsrate (blaue Linie) nach Neuenschwander et al. [5] und dem Preis pro Watt mittlerer Leistung von der mittleren Leistung. Quelle: Auswertung von Angeboten verschiedener Hersteller von UKP-Laserstrahlquellen 2020.

Wie funktioniert Strahlformung mit einem LCoS-SLM?

Die Verwendung eines LCoS-SLMs ermöglicht Strahlformung durch Phasenmodulation. Diese kann im Gegensatz zu einem statischen diffraktiven optischen Element dynamisch verändert werden. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau eines LCoS-SLMs

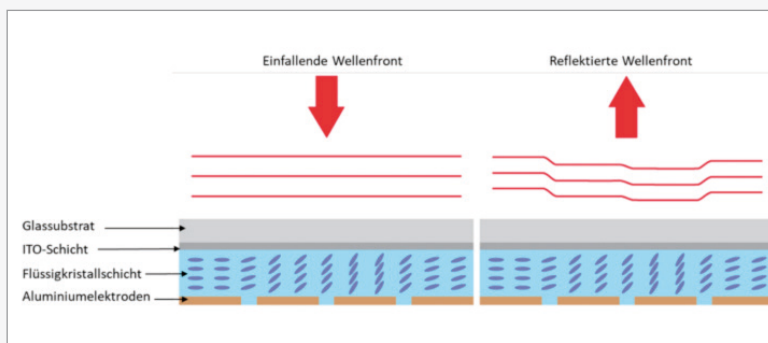


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines LCoS-SLMs. (vergl. [6])

Eine Schicht doppelbrechender Flüssigkristallmoleküle (engl.: Liquid Crystal; LC) befindet sich zwischen einer transparenten Schicht aus Indium-Zinn-Oxid (ITO) und einer reflektierenden Schicht aus Aluminiumelektroden. Geschützt wird der empfindliche Aufbau des LCoS-SLMs durch eine Glasschicht. Gegenüberliegende Elektroden bilden ein Pixel, dessen Brechungsindex durch die Ausrichtung der LC-Moleküle bestimmt wird. Eine einfallende Wellenfront erfährt eine Phasenveränderung, die von der angelegten Spannung des Pixels abhängt.

Für die Berechnung der erzeugten Intensitätsverteilung wird der LCoS-SLM als Apertur mit einem Phasenelement betrachtet, auf die die einfallende Welle trifft. Im Rahmen der Rayleigh-Sommerfeld-Näherung wird die Verteilung im Fernfeld wie folgt dargestellt [7]:

$$U(x', y') = \text{Abs} \{ \text{FT} [u(x, y) \cdot \exp(i\varphi(x, y))] \}$$

Die erzeugte Strahlform $U(x', y')$ entspricht dem Betrag der Fourier-Transformierten (FT) der einfallenden Intensitätsverteilung $u(x, y)$ und dem Phasenterm $\varphi(x, y)$, der durch den LCoS-SLM gesteuert wird.

Rotationssymmetrische Intensitätsverteilungen

Ein Ziel dieser Arbeit war die Erzeugung von großflächigen, rotationssymmetrischen Intensitätsverteilungen mittels diffraktiver Strahlformung, wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Dadurch soll in der UKP-Bearbeitung die nutzbare mittlere Leistung erhöht werden, während das Abtragsprofil idealerweise unabhängig von der Bewegungsrichtung des Scansystems ist. In Abbildung 3 sind die Propagationen der Teilstrahlen nach dem Durchlauf eines entsprechenden diffraktiven optischen Elements für drei rotationssymmetrische Intensitätsverteilungen schematisch dargestellt.

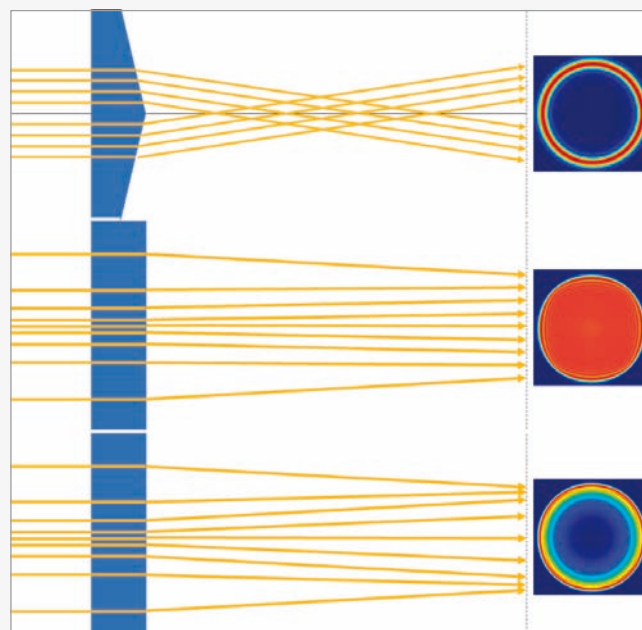


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Teilstrahlen für die Erzeugung einer ringförmigen Intensitätsverteilung mittels Axicon (oben), einer Tophat- (Mitte) und einer M-Shape-Verteilung (unten).

Für die Berechnung entsprechender Phasenmasken wurden Algorithmen zur geometrischen Lösung entwickelt sowie auf das Circular Dammann Grating zurückgegriffen. Die Simulation mittels Fourier-Transformation zeigt die erzeugten Intensitätsverteilungen. Weiterhin wurde der Einfluss von Position und Elliptizität der einfallenden Intensitätsverteilung untersucht. Demnach ist ein rundes Gauß-Profil, das den LCoS-SLM zentral trifft, eine Bedingung für rotationssymmetrische und homogene Intensitätsverteilungen in der Bearbeitungsebene. Somit konnte gezeigt werden, dass die simulierten Intensitätsverteilungen praktisch umsetzbar sind, wenn die Anforderungen an die Laserstrahlquelle in Hinblick auf die Rundheit des Strahls und die Strahlagenstabilität erfüllt sind. Im Folgenden werden die Bearbeitungsergebnisse in zwei Applikationsbeispielen für die erzeugten Intensitätsverteilungen präsentiert.

Anwendungsbeispiel: Perkussionsbohren mit geformter Laserstrahlung

Ein Verfahren zum Erzeugen von Bohrungen mittels UKP-Laser ist das Laserperkussionsbohren. Dabei werden aufeinanderfolgende Pulse in das Werkstück eingekoppelt, ohne dass eine Relativbewegung von Laserstrahl und Werkstück stattfindet. Die Tiefe der Bohrung wird durch die Anzahl der absorbierten Pulse bestimmt. Der Bohrdurchmesser hängt vom Durchmesser der Intensitätsverteilung sowie dem Verhältnis von Spitzenfluenz der Laserpulse zur Ablationsschwellfluenz des Werkstücks ab. Somit ist der maximale Bohrdurchmesser hierbei durch die maximale Pulsenergie des Lasersystems limitiert. Zum Fertigen von größeren Bohrungen, wird auf das Trepanieren zurückgegriffen. Dazu wird der Laserstrahl in Kreisen, deren Durchmesser

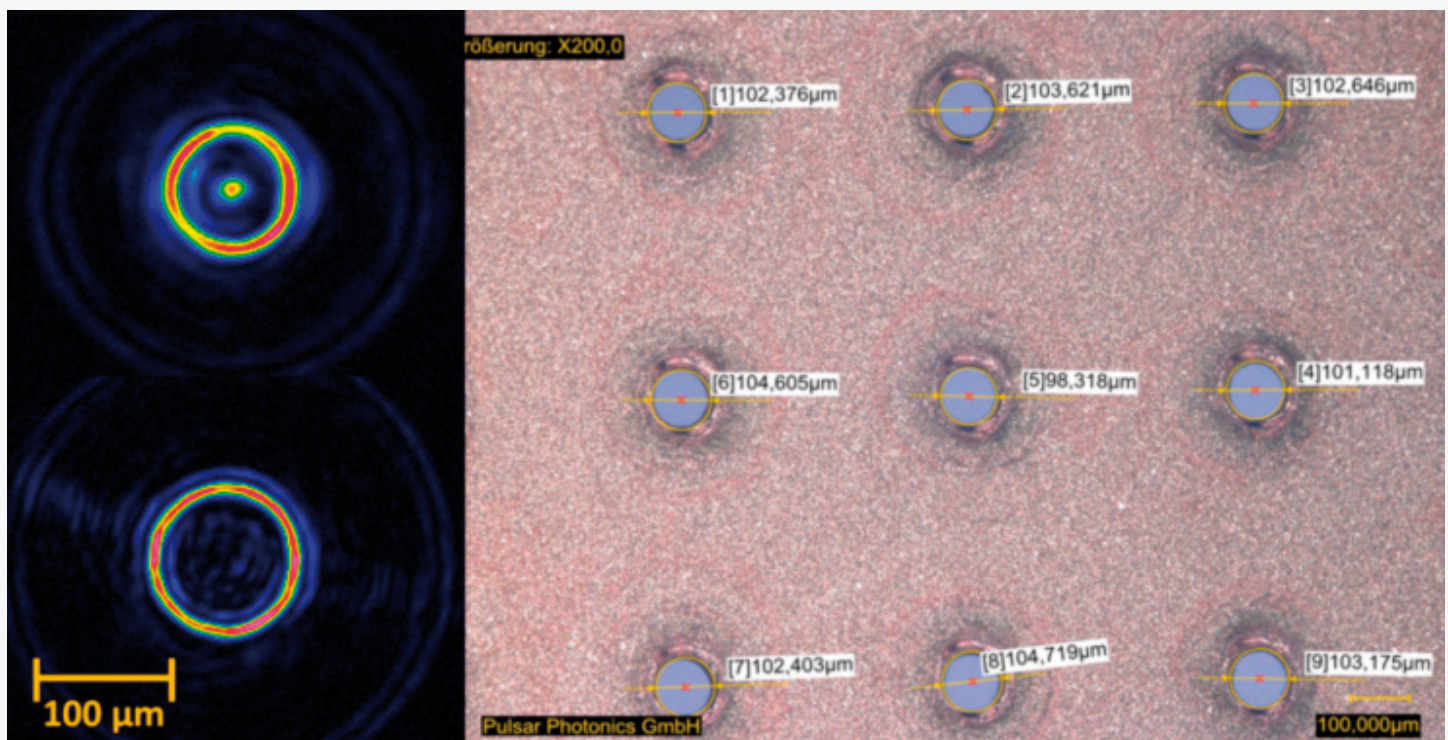


Abbildung 4: Links: Ringförmige Intensitätsverteilungen mit 100 µm und 115 µm Außendurchmesser, die mittels Circular Dammann Grating erzeugt wurden. Rechts: Mikrobohrungen, die mittels Perkussionsbohren mit geformter Laserstrahlung bei $P = 45,0$ W in einer Leiterplatte gefertigt wurden.

der Differenz von Strahl- und Bohrungsdurchmesser entspricht, über das Werkstück geführt.

Zur Erhöhung der Bohrrate mit dem vorliegenden System wurde das Perkussionsbohren mit geformter Intensitätsverteilung entwickelt. Hierbei wird eine Intensitätsverteilung mit dem Außendurchmesser in der Größenordnung der Bohrung erzeugt und eine definierte Anzahl an Laserpulsen in das Werkstück eingekoppelt, ohne dass der Laserstrahl bewegt wird. Die Verwendung eines Circular Damman Grating als Phasenverteilung auf dem LCoS-SLM führt zu einer ringförmigen Intensitätsverteilung mit digital anpassbarem Außendurchmesser auf der Werkstückebene. In Abbildung 4 sind zwei Intensitätsverteilungen mit 100 µm und 115 µm Außendurchmesser, sowie Bohrungen die mit der ersten Verteilung gefertigt wurden, dargestellt.

Bei der Herstellung von Micro-Vias mit 100 µm Außendurchmesser in einer 50 µm dicken Leiterplattenfolie, bestehend aus zwei Kupferschichten, die eine Polyimidschicht einschließen, beträgt die Bohrrate mit diesem Verfahren 346 Bohrungen pro Sekunde. Die Prozessgeschwindigkeit wurde somit im Vergleich zum Trepanieren um den Faktor 9,11

gesteigert. Darüber hinaus weisen die Bohrungen eine verringerte Konizität auf. Das ist auf den verlängerten Fokus der Intensitätsverteilung zurückzuführen, wodurch die Strahlform entlang der optischen Achse in einem Bereich von über 200 µm konstant ist. So konnte gezeigt werden, dass das Verfahren des Perkussionsbohrens durch gezielte Formung der Intensitätsverteilung die Möglichkeit bietet, hohe mittlere Leistungen beim Lasermikrobohren einzusetzen und somit hohe Bohrraten zu erreichen. Weiterhin ermöglicht die Strahlformung mittels LCoS-SLM, die Strahlform und somit auch den Bohrdurchmesser im Prozess dynamisch anzupassen und gleichzeitig die Bohrqualität in Hinblick auf die Konizität zu erhöhen.

Anwendungsbeispiel: Photonisches Schruppen und Schichten

Der Einsatz eines LCoS-SLMs ermöglicht eine dynamische Strahlformung. So kann während eines Prozesses die Intensitätsverteilung verändert werden. Beim photonischen Schruppen und Schichten wird der gesamte Bearbeitungsprozess in zwei Teilprozesse aufgeteilt. Im Schrupp-

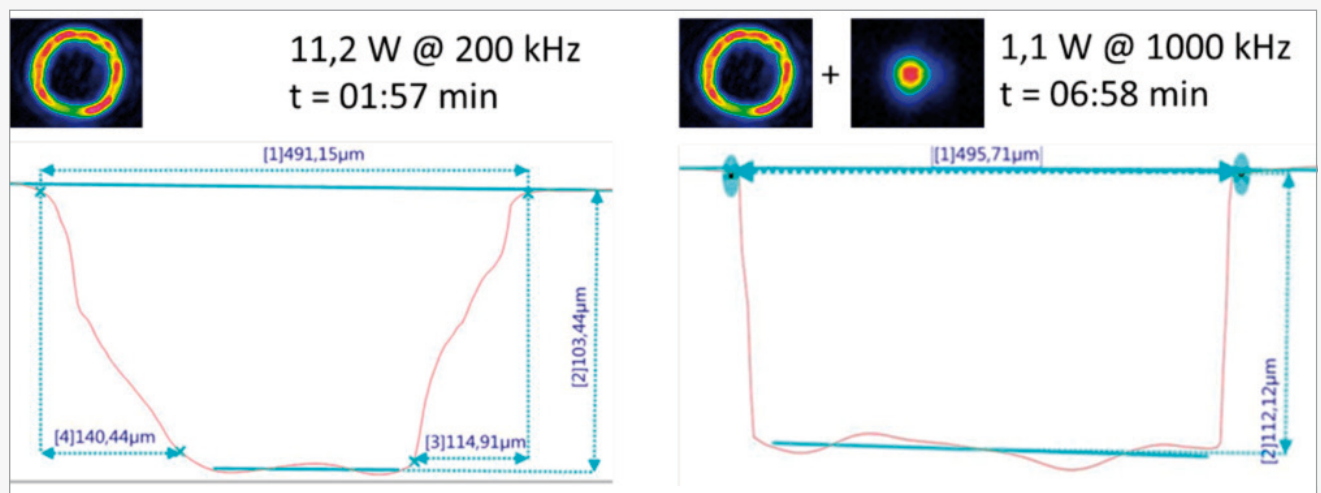


Abbildung 5: Links: Abtragsprofil nach dem Schrupp-Prozess mit einer ringförmigen Intensitätsverteilung bei P = 11,2 W. Rechts: Abtragsprofil nach dem photonischen Schruppen und Schichten. Der Schlichtprozess wurde bei P = 1,1 W durchgeführt.

prozess wird die Struktur mit einer großflächigen Intensitätsverteilung bearbeitet. So kann mehr Leistung auf das Werkstück gebracht und dadurch die Abtragsrate gesteigert werden. Die Strukturauflösung ist bei diesem Prozess kleiner als bei der Bearbeitung mit dem beugungsbegrenzten Gaußstrahl. In Abbildung 5 links ist das Abtragsprofil nach der Bearbeitung mit einer ringförmigen Intensitätsverteilung dargestellt. Nach diesem Prozessschritt ist die Zieltiefe im Zentrum des bearbeiteten Bereichs bereits erreicht, jedoch weisen die Kanten eine geringe Steilheit auf.

Nach dem groben Materialabtrag werden die Konturen im Schlichtprozess nachbearbeitet, um die Strukturauflösung zu erhöhen. Hierfür wird der beugungsbegrenzte Gaußstrahl verwendet. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Wahl eines geeigneten Schlicht-Prozesses zu einer starken Erhöhung der Kantensteilheit führt. So wurde die angestrebte Zielgeometrie erreicht. Im Vergleich zur Herstellung ohne den Einsatz von Strahlformung bei der abtragsoptimierenden Repetitionsrate nach Neuenschwander et al. [5] konnte die Prozesszeit um Faktor 2,68 reduziert werden.

Literatur

- [1] Chichkov, B. N.; et al.: Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, In: Applied Physics (Bd. 63), S. 109–115
- [2] Gattass, Rafael R.; Mazur, Eric: Femtosecond laser micromachining in transparent materials, In: Nature Photonics (Bd. 2), H. 4, S. 219–225
- [3] Leitz, Karl-Heinz; et al.: Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses, In: Physics Procedia (Bd. 12), S. 230–238
- [4] Eifel, Stephan: Effizienz- und Qualitätssteigerung bei der Lasermikrobearbeitung mit UKP-Lasern durch neue optische Systemtechnik. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2015, 1. Aufl., Aachen, Apprimus-Verl., 2015 (Ergebnisse aus der Lasertechnik)
- [5] Neuenschwander, Beat; et al.: Processing of metals and dielectric materials with ps-laserpulses: results, strategies, limitations and needs, In: Niino, Hiroyuki; Meunier, Michel; Gu, Bo; Hennig, Guido (Hrsg.): Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing XV, SPIE, 2010 (SPIE Proceedings), 75840R
- [6] Thorlabs Inc.: Spatial Light Modulators, Internet, 2019-06-06, (https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10378)
- [7] O'Shea, Donald C.: Diffractive optics: Design, fabrication, and test, Bellingham, Wash. (1000 20th St. Bellingham WA 98225-6705 USA), SPIE, 2004 (Tutorial texts in optical engineering v. TT 62)

Patrick Mc Kearney
 Hochschule RheinMain
 Am Brückweg 26
 65428 Rüsselsheim
 Telefon: +49 6142 898 4527
www.hs-rm.de

ANZEIGE

Optik & Beleuchtung

**KUNSTSTOFF
INSTITUT
LÜDENSCHIED**

Ihr Partner für innovative Lösungen

Kunststoff-Institut Lüdenscheid | Karolinenstr. 8 | 58507 Lüdenscheid | +49 (0) 23 51.10 64-191 | mail@kimw.de | www.kimw.de

shutterstock.com/Who_is_Danny

Extrem dünne Kristalle als Laser-Lichtquellen

Laser-Emission bei Raumtemperatur nachgewiesen: Halbleiter aus drei Atomschichten könnten Basis für neuartige Laser bilden.

Kristalle, die nur aus drei Lagen von Atomen bestehen, können bei Raumtemperatur Licht abstrahlen, das dem eines Lasers gleicht. Diese neuartigen Materialien haben damit das Potenzial, als Lichtquellen in miniaturisierten Schaltkreisen oder auch in zukünftigen Quanten-Anwendungen zum Einsatz zu kommen. Das berichtet ein internationales Team um die Oldenburger Physiker Dr. Hangyon Shan, Prof. Dr. Christian Schneider und Dr. Carlos Anton-Solanas in der Zeitschrift Nature Communications.

Das Team nutzte für die Untersuchungen die Verbindung Wolframdiselenid. Erst im Mai hatte dasselbe Team in der Zeitschrift Nature Materials berichtet, dass eine Schicht des Materials Molybdän-Diselenid bei tiefen Temperaturen Laser-Licht erzeugt.

Nun haben die Forscher den nächsten Meilenstein erreicht und den gleichen Effekt bei Raumtemperatur erzeugt. Die Laser-Emission beruht auf physikalischen Objekten, die gleichzeitig aus Materie und Licht bestehen – sogenannte Exziton-Polaritonen.

Originalpublikation:

Hangyong Shan et al: „Spatial coherence of room-temperature monolayer WSe2 exciton-polaritons in a trap“, Nature Communications 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-26715-9

[> Weitere Informationen](#)

Erster topologischer Laser aus vertikalen Resonatoren entwickelt

Israelische und deutsche Forscher und Forscherinnen des Exzellenzclusters ct.qmat – Komplexität und Topologie in Quantenmaterialien haben die weltweit erste Methode entwickelt, um ein Netzwerk oberflächenemittierender Laser dazu zu bringen, wie ein einziger Laser zu agieren - als hocheffektives Lasernetzwerk in Sandkorngröße.

Das israelische und deutsche Team hat einen Weg gefunden, die Konzepte der topologischen Photonik mit VCSEL-Mikrolasern zu nutzen. Diese Laser strahlen das Licht durch ihre Oberfläche ab, während der topologische Prozess, der für die gegenseitige Kohärenz verantwortlich ist, in der Ebene des Chips stattfindet. Das Endergebnis ist ein leistungsstarker, aber sehr kompakter und effizienter Laser, der in der Anzahl der Laserelemente nicht begrenzt ist und nicht durch Defekte oder Temperaturschwankungen beeinträchtigt wird.

[> Weitere Informationen](#)

Eine stark vereinfachte Methode zur Vorhersage von Quantenwechselwirkungen zwischen Licht und Materie

Wenn Licht mit Materie wechselwirkt, kann dies das Verhalten des Materials grundlegend verändern. Je nach Art der Wechselwirkung laufen manche chemische Reaktionen anders ab, werden Stoffe magnetisch oder ferroelektrisch oder beginnen, Strom ohne Verluste zu leiten. Besonders interessant sind Fälle, in denen nicht einmal eine reale Lichtquelle notwendig ist, weil schon die bloße Möglichkeit der Existenz von Licht oder seines Quantenäquivalents, der Photonen, das Verhalten von Materie verändern kann. Theoretiker versuchen, diese faszinierenden Phänomene zu beschreiben und vorherzusagen, weil sie für die Entwicklung neuer Quantentechnologien entscheidend sein könnten. Die Methode führt zu signifikanten Einsparungen bei der Rechenzeit und erlaubt es Wissenschaftler*innen, das Zusammenspiel zwischen Quantenlicht und Materie für realistische Systeme in Situationen vorherzusagen, die bisher nur schwer zu simulieren waren.

[> Weitere Informationen](#)

Lichtfeld spiegelt die Struktur des vierdimensionalen Raums wider

Licht wird in modernen Anwendungen zu verschiedenen Zwecken eingesetzt. Daten lassen sich zum Beispiel mit Licht übertragen und nanoskopische Strukturen durch Licht erzeugen. Um solche Anwendungen zu ermöglichen, muss das Licht räumlich strukturiert werden. Dazu werden seine Eigenschaften – Intensität (Helligkeit), Phase (Position im Schwingungszyklus) und Polarisation (Richtung der Lichtschwingung) – „maßgeschneidert“. Typischerweise entstehen so im dreidimensionalen Raum strukturierte Lichtfelder, zum Beispiel durch die Anwendung eines Hologramms. Darüber hinausgehend hat nun ein internationales Forscherteam um Prof. Dr. Cornelia Denz von der Westfälischen Wilhelms-Universität (WWU) Münster und Prof. Dr. Mark Dennis von der Universität Birmingham (Großbritannien) eine Methode entwickelt, mit der das Licht derart strukturiert wird, dass eine Projektion aus dem vierdimensionalen Raum entsteht. Die Ergebnisse wurden jetzt in der Fachzeitschrift „Nature Communications“ veröffentlicht.

„Auf der Basis dieser Forschungsergebnisse könnten zukünftig neue Arten von Laserstrahlen entwickelt werden, mit denen Datenkommunikation sicherer wird. Die Anordnung von Nanostrukturen könnte vielseitiger und einfacher und die Materialbearbeitung präziser gestaltet werden“, gibt Cornelia Denz einen Ausblick

[> Originalpublikation](#)

[> Weitere Informationen](#)



Mikro

goes

Makro

Autoren:

Arnold Gillner
Martin Reininghaus
Keming Du
Stephan Brüning

**Präzision gepaart mit
Produktivität bei der Bearbeitung
mit Ultrakurzpulslasern**

Skalierung durch Parallelisierung

Mit ultrakurz gepulsten Laserstrahlquellen lassen sich eine Vielzahl funktioneller Eigenschaften mit höchster Präzision herstellen. Durch die extrem hohen Pulsspitzenleistungen lassen sich jedwede Materialien bearbeiten, unabhängig von Härte und Verdampfungstemperatur. Das Schneiden von Displays und Saphir für Mobiltelefone sind eine der wesentlichen Anwendungen, wie auch die Bearbeitung ultraharter Werkzeuge. Darüber hinaus gibt es bereits heute Anwendungen, bei denen eine flächige Bearbeitung gewünscht ist, wie beispielsweise die Erzeugung von Oberflächenstrukturen für Druck-, Präge und Abformwerkzeuge, die Herstellung von feinsten Bohrungen in Bauteilen der Medizin- oder Elektrotechnik oder der Herstellung von Mikrodüsen. Diese und viele andere Applikationen von Ultrakurzpulslasern werden heute mit Laserstrahlquellen im Leistungsbereich bis ca. 200 W gelöst. Entsprechend ist die Produktivität bei diesen Anwendungen noch gering, insbesondere wenn es um die Übertragung auf große Bauteile und hoher Flächenraten geht.

Die mittlere Leistung kommerziell verfügbarer, ultrakurz gepulster Laserstrahlquellen steigt stetig an. Durch die höhere Produktivität und damit verbundene verbesserte Wirtschaftlichkeit erschließen Ultrakurzpulslaser somit immer mehr Anwendungsbereiche. So werden heute industrietaugliche Pico- und Femtosekundenlaser mit mittleren Leistungen von üblicherweise bis zu 200 W kommerziell eingesetzt. Insbesondere für die hochpräzise Bearbeitung von Metallen und Keramiken sowie der Erzeugung von Mikrostrukturen auf großen Flächen sind die Prozesse in vielen Fällen allerdings immer noch zu langsam um wirtschaftlich abbildbar zu sein. Zum einen werden noch wesentlich höhere mittlere Leistungen benötigt um die Prozesse ausreichend produktiv gestalten zu können und zum anderen ist die Umsetzung von hohen Laserleis-

tungen nicht ohne weiteres möglich, wenn die hohe Präzision und Bearbeitungsqualität erhalten bleiben soll.

Die Grenzen der Leistungsskalierung

Bedingt durch prozesstechnische und physikalische Limitationen kann jedoch die Produktivität eines Ultrakurzpuls-Bearbeitungsprozesses nicht durch eine einfache Leistungsskalierung wie beispielsweise beim Schweißen oder Schneiden skaliert werden. Mit der Festlegung optimaler Pulsenergien für den Prozess sind heute vor allem in der Präzisionsbearbeitung mit Strukturgrößen von wenigen Mikrometern und Genauigkeiten im Sub-Mikrometerbereich nur geringe Produktivitäten bei entsprechend geringen Laserleistungen möglich. Demgegenüber werden aktuell von allen Laserherstellern Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser im Multi-100 W-Bereich und künftig im kW-Bereich entwickelt. Diese hohen Leistungen sind jedoch entweder nur mit extrem hohen Pulsfrequenzen im Multi-10-MHz-Bereich oder mit sehr hohen Pulsenergien im mJ-Bereich möglich. Dies bedeutet, dass für einen energetisch optimalen Bearbeitungsprozess bei geringen Energiedichten in der Bearbeitung sehr hohe Geschwindigkeiten der Strahlableitung erforderlich sind, um die einzelnen Pulse voneinander zu trennen oder aber der Laserstrahl auf sehr viele Teilstrahlen aufgeteilt wird, um im jeweiligen Teilstrahl die optimale Pulsenergie einstellen zu können. Nur damit können die spezifischen Vorteile dieser Verfahrenstechnik in vollem Umfang beibehalten werden.

Die Steigerung der Pulsenergien führt ab einem bestimmten Schwellwert zur Ausbildung von Oberflächendefekten, die zu sehr rauen Oberflächen führen und damit die Bearbeitungspräzision reduzieren (Bild 1, Mitte). Bei Verwendung hoher Pulsfolgefrequenzen müssen

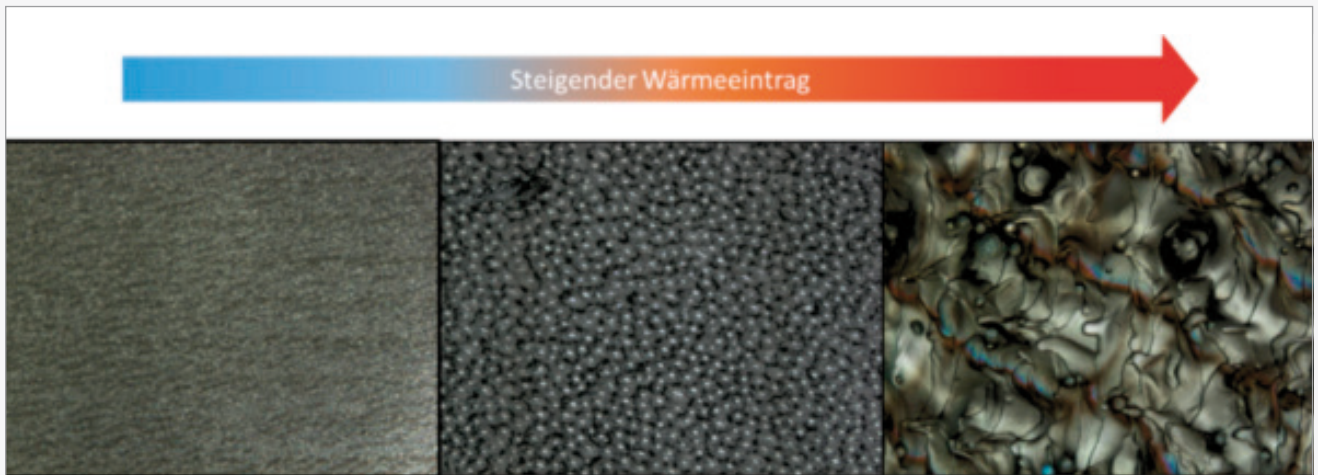


Bild 1: Thermische Effekte bei der Ultrakurzpulsbearbeitung. Bei Verwendung zu hoher Leistungen treten Oberflächendefekte (Mitte) bis hin zu ausgeprägter Schmelze (rechts) auf. Der Vorteil der präzisen Laserbearbeitung mit wenig thermischer Beeinflussung (links) geht somit verloren.

vor allem Wechselwirkungseffekte wie Plasmaabsorption oder Streuung an Abtragspartikeln betrachtet werden. Eine zu hohe Leistung führt bei beiden Skalierungsansätzen durch aufgestaute Wärme zu thermischen Effekten, die das Bearbeitungsergebnis beeinflussen. Dies äußert sich in Anlauffarben, Schmelz- und Gratbildung oder Materialanlagerungen (Bild 1, rechts).

In der folgenden Tabelle sind die beiden Ansätze zur Leistungsskalierung gegenübergestellt:

Multistrahl-Technologien

Der Ansatz der Multistrahlbearbeitung besteht darin, die Laserstrahlung aus einer Quelle in mehrere Teilstrahlen aufzuspalten und ein Werkstück so mit einer Vielzahl an Werkzeugen gleichzeitig zu bearbeiten. So kann jeder Teilstrahl am optimalen Arbeitspunkt verwendet werden, während die insgesamt am Werkstück anliegende Laserleistung durch die Anzahl an Teilstrahlen direkt skaliert werden kann.

Ansatz	Schnelle Strahlablenkung (mit Polygonscanner)	Multistrahl- bearbeitung (Feste Strahlverteilung)
Repetitionsraten	Hoch (> 10 MHz)	Moderat (< 1 MHz)
Pulsenergien:	Klein (< 50 µJ)	Groß (> 1m J/)
Prozesseffizienz/ „Duty Cycle“	Gering, starke Abhängigkeit von Strukturgeometrie	Hoch, geringe Abhängigkeit von Strukturgeometrie
Werkzeugbahnen	Linien, Uni-direktional	Beliebig
5-Achs-Bearbeitung	Nein	Eingeschränkt
Präzision	Hoch (mit Korrektur)	Begrenzt durch Verzeichnungen
Strukturtypen	Beliebige Strukturen	Periodische Strukturen

Die Strahlteilung erfolgt üblicherweise mittels teildurchlässiger Spiegel oder speziell ausgelegter Phasenmasken (diffraktive Optiken). Hierbei ist die Verwendung teildurchlässiger Spiegel zwar kosteneffizient und robust, aber in der Skalierbarkeit deutlich eingeschränkt. Durch Phasenmasken können prinzipiell beliebig viele Teilstrahlen erzeugt werden. Die Transmission eines solchen optischen Systems liegt typischerweise im Bereich von 80 %. Ein typischer Aufbau einer Optik zur Multistrahlbearbeitung ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Hierbei wird ein Bündel von Teilstrahlen erzeugt, das zur Bearbeitung großer Flächen mit einem Galvanometerscanner verknüpft wird und bei dem das Strahlenbündel flexibel auf Bauteilen positioniert werden kann.

Das System besteht in der Regel aus einem diffraktivem optischen Element mit dem aus dem Rohstrahl mehrere Teilstrahlen erzeugt wird. Mittels einer Abbildungsoptik werden die Teilstrahlen parallelisiert und fokussiert. Im Zwischenfokus können unerwünschte Beugungsordnungen über einen Raumfilter gefiltert werden. Der Ort des diffraktiven Strahlteilers wird über eine weitere Optik zwischen die Spiegel eines Galvanometerscanners abgebildet und in der Arbeitsebene eines Planfeldobjektivs entsteht ein Array von fokussierten Teilstrahlen. Es können folgenden Varianten von Multistrahloptiken unterschieden werden:

Mit diesem Ansatz hat sich die Projektgruppe aus Prozessentwickler (Fraunhofer ILT), Laserhersteller (Edgewave) und Maschinenbauer (Schepers) zusammengefunden, um mit ihren jeweiligen Kompetenzen eine für die Ultrakurz-puls-Laserbearbeitungstechnik völlig neue System- und Fertigungslösung zu entwickeln.

Dabei werden je nach Anwendung unterschiedliche Skalierungsansätze und Anwendungen verfolgt. Dabei bleibt bei allen Realisierungslösungen der technologische Ansatz immer gleich, indem die zur Verfügung stehende Laserleistung auf eine Vielzahl von Teilstrahlen (aktu-

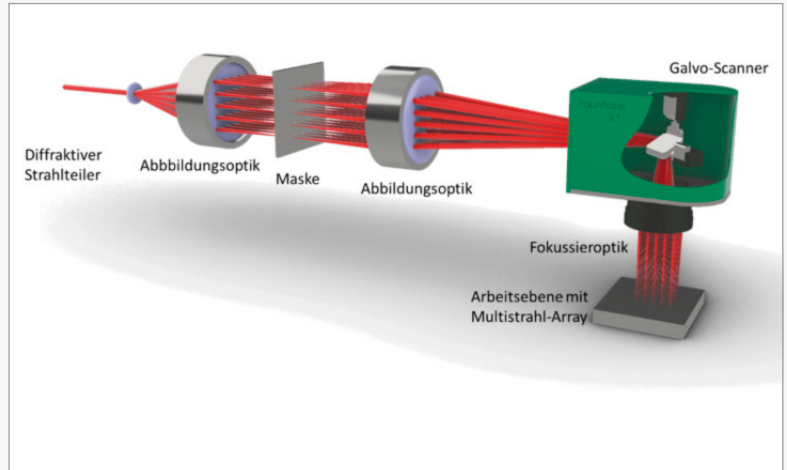


Bild 2: Prinzipskizze eines optischen Aufbaus zur Erzeugung einer Multistrahlverteilung.

ell >10 und künftig $> 100-1000$) aufgeteilt wird. Gleichzeitig werden die einzelnen Teilstrahlen in ihrer Leistung unabhängig geschaltet. Durch diese leistungstechnische und energetische Aufteilung der Laserpulse kann die hervorragende Abtragsqualität der Ultrakurzpulstechnologie beibehalten und trotzdem integral die Abtragsleistung der Maschine und damit die Produktivität signifikant gesteigert werden. Im einfachsten Fall skaliert die Produktivität mit der Anzahl der beteiligten Teilstrahlen. Für eine hochpräzise Bearbeitung im Mikrometerbereich genügen typischerweise Pulsenergien von einigen μJ . Bei Laser-Pulsenergien von $500 \mu\text{J}$ und Pulsfrequenzen von 1 MHz , gleichbedeutend einer mittleren Leistung von 500 W können somit bis zu 500 Teilstrahlen erzeugt werden. Sind alle Teilstrahlen gleichzeitig im Einsatz bedeutet dies eine Produktivitätserhöhung um den Faktor 500 . Das Fraunhofer ILT hat hier frühzeitig in der Entwicklung der Ultrakurz-puls-Laser-Bearbeitungstechnik entsprechende Fragestellungen bearbeitet und Multistrahl-Komponenten entwickelt, die industriell eingesetzt werden. Diese Entwicklungen werden zudem über Spin-Offs des ILT, wie beispielsweise über die Fa. Pulsar sowie über weitere Lizenzierungen im Markt platziert.

Multistrahloptik mit fester Strahlverteilung

Für eine statische Multistrahl-Lösung wird als Strahlteiler eine feste Phasenmaske verwendet. Das periodische Muster der erzeugten Teilstrahlen in der Arbeitsebene ist durch das diffraktive Element festgelegt. Somit können periodische Strukturen mit einem maximalen Abstand der Teilstrahlen in der Bearbeitungsebene hergestellt werden. Periodisch wiederkehrende Strukturen, die kleiner sind als der Abstand der Teilstrahlen können durch Scannerbewegungen realisiert werden. Die Ausdehnung einer Strahlverteilung, die Scannbewegung der gesamten Strahlverteilung und Verzeichnungen im optischen System führen jedoch zu Positionsfehlern der einzelnen Teilstrahlen auf der Werkstückoberfläche. Da für eine feste Strahlverteilung keine Korrektur der einzelnen Teilstrahlen zueinander erfolgen kann, begrenzen die Verzeichnungen die erzielbare Bearbeitungspräzision. Durch richtige Auslegung des optischen Systems können trotzdem Positionsfehler von unter 1 µm erreicht werden.

Multistrahloptik mit flexibler Strahlverteilung

Für eine dynamische Strahlverteilung wird als diffraktiver Strahlteiler eine programmierbare Phasenmaske verwendet. Wie in einem LCD Display werden hierbei Flüssigkristalle verwendet, deren Ausrichtung elektronisch beeinflusst wird. Durch Änderung der Phasenmaske lässt sich die Strahlteilung im Prozess dynamisch anpassen. Prinzipiell lässt sich mit diesen Optiken nicht nur Strahlteilung sondern auch Strahlformung realisieren. Die Schaltfrequenz einer programmierbaren Phasenmaske beträgt maximal ca. 120 Hz und die zulässige mittlere Leistung liegt im Bereich von 100 W. In Bild 3 ist eine flexible Bearbeitungsoptik auf der Basis eines schaltba-

ren LCOS-Phasenmodulators in Kombination mit einem Galvanometer gezeigt. Bei diesem System wird das erzeugte Strahlenarray mittels 2-Achsen-Scannerspiegeln über das Bauteil bewegt, so dass auch größere Bearbeitungsfelder erreicht werden können.

Multistrahloptik mit flexibel schaltbaren Teilstrahlen

Für höhere Schaltfrequenzen und höhere mittlere Laserleistungen wird eine feste Phasenmaske verwendet, allerdings kommt zusätzlich ein Array aus akusto-optischen Modulatoren zum Einsatz, um die einzelnen Teilstrahlen unabhängig voneinander schalten zu können. Vorteil dieser Systeme ist, dass beliebige – auch nicht periodische – Strukturen erzeugt werden können. Durch Anpassung der Schaltzeiten können zudem Verzeichnungen des optischen Systems kompensiert werden wodurch die Verwendung wesentlich größerer Bearbeitungsfelder ermöglicht wird. Die Steigerung der Produktivität ska-

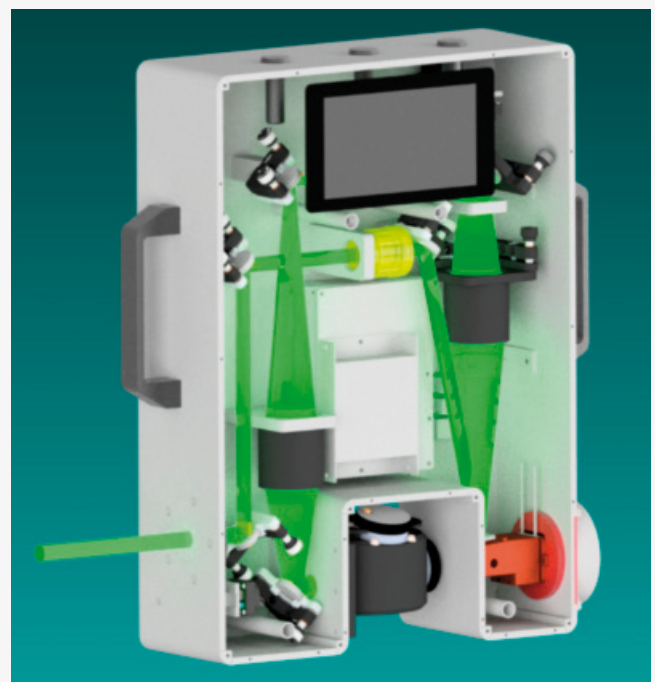


Bild 3: Programmierbare diffraktive Optik mit 2D-Phasenmodulator

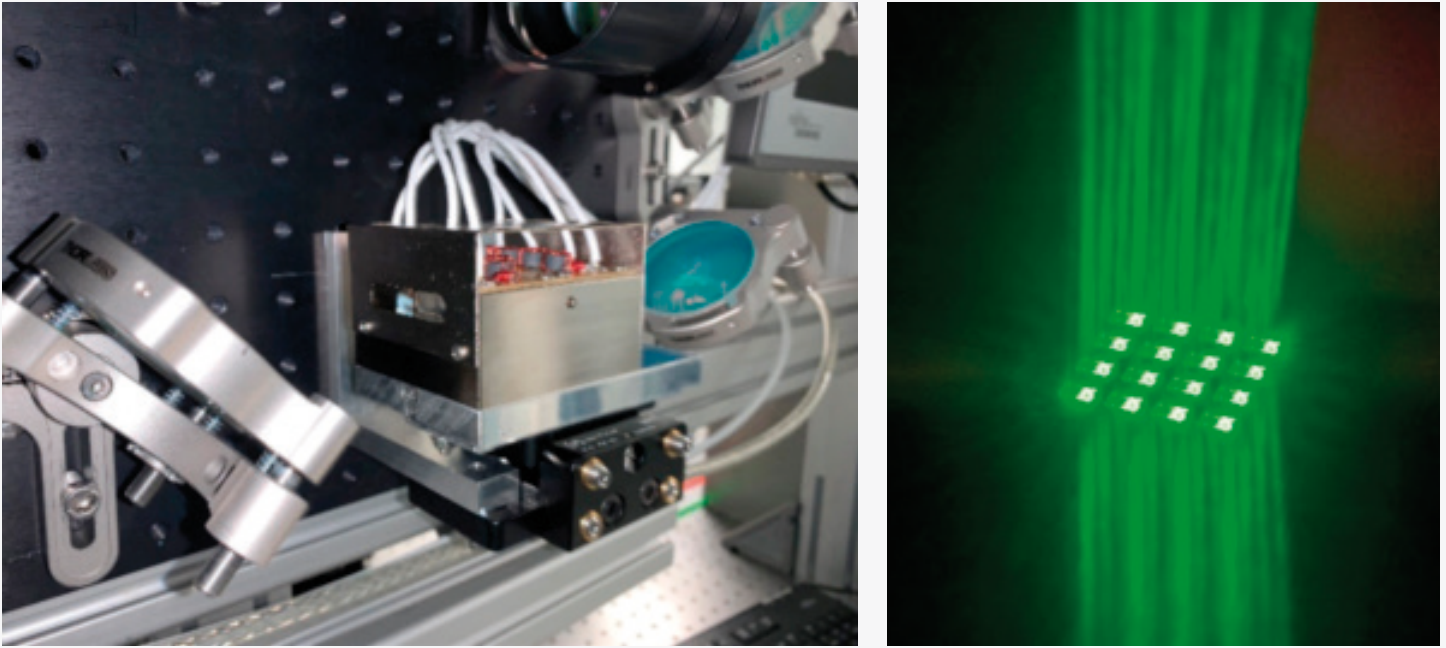


Bild 4: Akustooptischer Multistrahls-Modulator für hohe mittlere Leistungen (links), Hochleistungs-Multistrahlsbearbeitung (rechts)

liert dabei mit der Anzahl der Teilstrahlen, so dass bei hohen verfügbaren Laserleistungen und Pulsenergien auch hohe Abtragsleistungen von mehreren $100 \text{ mm}^3/\text{min}$ erreicht werden können. Für die Einhaltung einer hohen Abtragsqualität ist jedoch eine exakte Anpassung von Pulsfrequenz und Spotabstand nötig, um thermische Effekte, wie Wärmeakkumulation und Schmelzbildung zu vermeiden.

Mit dem neuartigen Ansatz der Vielfachstrahlaufteilung und der Einzelmodulation der Teilstrahlen lassen sich nicht nur periodische Abtragsmuster erzeugen. Eine besondere Herausforderung liegt allerdings in der Fragestellung, wie eine Vielzahl parallel arbeitender Einzelstrahlen komplexer dreidimensionale Oberflächenstrukturen erzeugen kann. Hierzu wird in der gemeinsamen Entwicklung der innovative Ansatz der Multistrahls-Einzelstrahl-Modulation verfolgt. Mit dieser Lösung ist es möglich, nicht nur periodische Muster mit einer Multistrahls-Technologie zu erzeugen sondern beliebige Strukturierungsgeometrien durch die zeitliche und energetische Modulation jedes einzelnen Teilstrahls zu ermöglichen. Es entsteht

ein optischer Kamm mit variabler Wirkenergie der einzelnen Strahlen, der über das Werkstück geführt wird.

Die Innovation, d.h. die Umsetzung grundlegender Entwicklungen zur Ultrakurzpulstechnik bis zur wirtschaftlichen Verwertung erfolgte in enger Zusammenarbeit aus grundlegender Wechselwirkungsforschung mit Laserentwicklung, Optikentwicklung, Maschinentechnik und Anwendungstechnik. Das Fraunhofer ILT hat hierzu in den vergangenen 10 Jahren eine Vielzahl unterschiedlicher Ultrakurzpulsprozesse zum Bohren, Strukturieren und Modifizieren entwickelt und in die Fertigung gebracht. Mit der Entwicklung optischer Systeme zur hochpräzisen Strahlaufteilung unter Beibehaltung der Strahlqualität auf größer 10 bzw. größer 100 Teilstrahlen am Fraunhofer ILT sowie der dazugehörigen Prozesstechnik konnte die Grundlage für die flexible Multistrahls-Technologie gelegt werden.

Die Fa. Edgewave entwickelte eine Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Laserstrahlquelle mit sehr guten Strahlqualitäten, die auch unter den Bedingungen einer diffraktiven Strahlteilung

und akustooptischen Modulation gleichbleibend hohe Strahlqualität und Reproduzierbarkeit am Bearbeitungsort liefert.

Die Fa. Schepers schließlich integrierte das Gesamtsystem in eine Maschine zur großformatigen Strukturierung von Druck- und Prägewalzen. Hierbei standen vor allem die Fragestellungen der flexiblen hochdynamischen Strahlmodulation und der prozesstechnischen Anpassung der Multistrahlanordnungen und –energien im Vordergrund. Schepers hat im Verbund die Basis für die Multistrahls-Steuerung und die Maschinenintegration realisiert, die mittlerweile serienmäßig in der Druck- und Prägetechnik eingesetzt wird.

Mit diesem innovativen Prozess- und Maschinenkonzept können erstmals hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten und Produktivitäten bei höchster Präzision im Mikro- und Nanometerbereich in einem einzigen Fertigungssystem realisiert werden. Durch die neuartige Verfahrens- und Systemtechnik lässt sich die Bearbeitungsgeschwindigkeit in der Ultrakurzpulsbearbeitung um einen Faktor 100 und mehr steigern. Aktuell wurde dies in einer ersten industriellen Umsetzung für die Druckindustrie mit einem Faktor 10 durch die Kombination aus Multistrahls-technik und hinsichtlich Abtrageeffizienz optimierter Pulsdauer von 1 ps realisiert.

Als erstes Anwendungsszenario für die großflächige Mikro- und Nanostrukturierung hat die Fa. Schepers in den letzten drei Jahren 20 Digital Zylinder-Mikrostrukturierungssysteme mit vier parallel (unabhängig voneinander) ablatierenden Spots für die Anwendungen Prägung und Wertpapierdruck mit Pikosekundenlasern umgesetzt. Mit diesen großformatigen Walzen-graviersystemen werden Druck- und Prägemaster erzeugt, die für die parallele Vervielfältigung (wie z.B. Roll-to-Roll-Prozesse) von mikroskopischen und nanoskaligen Strukturen in Druck- oder Prägeprozessen verwendet werden.

Anwendungen: Feinstfilter und Werkzeuge

Die Ultrakurzpuls-Multistrahlsbearbeitung eignet sich besonders für die Bearbeitung von Werkstücken zur Skalierung der Produktivität, um die Prozessbedingungen bei optimierten Bearbeitungsparametern aus Einzelstrahlprozessen auf höhere mittlere Laserleistungen umzusetzen. Insbesondere für die Bearbeitung thermisch sehr sensibler Werkstücke wie Metallfolien oder für die Erzeugung sehr feiner Strukturen ist dies der Fall. In Bild 5 ist als Anwendungsbeispiel für die Verwendung einer statischen Multistrahlsverteilung

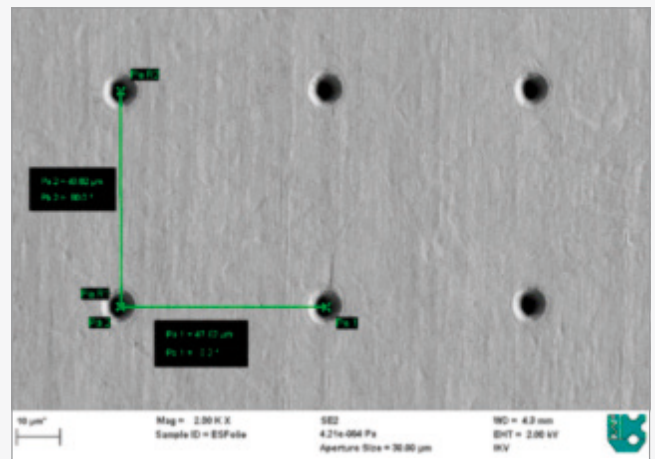
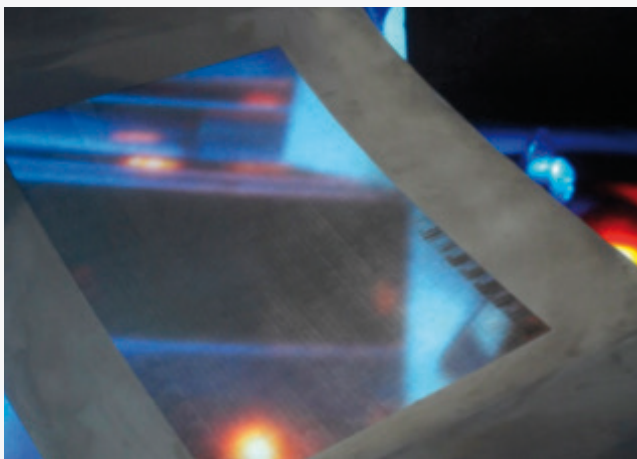


Bild 5: Feinstfilter, gebohrt mit statischer Multistrahlsverteilung. Mit 144 Teilstrahlen beträgt die maximale Bohrrate mehr als 20000 Löcher pro Sekunde.



Bild 6: Ballardhaut (1.2m x 1.2m), die über flexibel schaltbaren 8-fach Multistrahlanlass strukturiert wurde(links). Scannerbasierte Strukturierungsprozess mit 8 individuell adressierbaren Teilstrahlen zur Erzeugung beliebiger Oberflächenstrukturen.

lung eine gebohrte Metallfolie für Filtereinsätze gezeigt. Mit 144 Teilstrahlen beträgt die maximale Bohrrate über 20000 Löcher pro Sekunde. Für Filterung feinsten Partikel oder sogar Bakterien können Austrittsdurchmesser $< 1 \mu\text{m}$ realisiert werden.

Individuell schaltbare Multistrahlen werden weiterhin für die Strukturierung von Präge- und Druckwalzen eingesetzt. Eine mit dieser Technologie strukturierte Ballardhaut ist in Bild 6 gezeigt. Hier wurden 8 einzeln schaltbare Teilstrahlen verwendet um eine Stahl-Prägewalze parallel zu bearbeiten. Die Strukturauflösung ist besser $10 \mu\text{m}$. In Bild 6 (rechts) ist der Strukturierungsprozess mit einer scannerbasierten Multistrahloptik mit flexibel schaltbaren Teilstrahlen gezeigt. Durch die Verwendung von 8 Teilstrahlen werden bei einer Überfahrt 8 Schichten abgetragen. Je nach zu erzeugender Struktur sinkt die benötigte Prozesszeit so um einen Faktor 6 bis 8.

Mit der Multistrah-Technologie wird es in Zukunft möglich sein, das Leistungspotential aktueller Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Lasersysteme für eine Vielzahl von Bearbeitungsaufgaben voll auszuschöpfen. Entsprechend sinken die Bearbeitungszeiten, was zu einer deutlichen Reduzierung der Gesamtprozesskosten führt. Dadurch wird der Laser für die Herstellung von

Mikrostrukturen aus wirtschaftlicher Sicht für die Anwender zunehmend attraktiver. Mit der aktuellen Leistungsskalierung von Ultrakurzpulslasern von typischerweise 100 W in den Kilowatt-Bereich sowie der hier vorgestellten Technologie wird es wirtschaftlich machbar, die Ultrakurzpulsbearbeitung auf große Bauteile zu übertragen. Damit wird es möglich, mit einem vollständig digitalen Ansatz hochpräzise Strukturen mit Mikrometergenauigkeit auch auf großen Oberflächen zu erzeugen.

Ein Teil der hier dargestellten Arbeiten wurde mit Mitteln des BMBF im Rahmen des Vorhabens Multisurf unter dem Förderkennzeichen 13N13096 entwickelt.



Prof. Dr.-Ing. Arnold Gillner
Leiter Kompetenzfeld
Abtragen und Fügen
Fraunhofer-Institut für
Lasertechnik ILT

Steinbachstraße 15
52074 Aachen, Germany
Telefon +49 241 8906-148
E-Mail: arnold.gillner@
ilt.fraunhofer.de
www.ilt.fraunhofer.de



Im Forschungsprojekt »DeMoBat« entwickelt ein Forschungsteam vom Fraunhofer IPA einen Industrieroboter, der die ausgedienten Batterien von Elektroautos sortenrein demontiert. Dazu muss er zunächst einmal das Gehäuse aufschrauben.



Quelle: Rainer Bez, Fraunhofer IPA

ROBOTER recycelt Batterien

Die ausgedienten Batterien von Elektroautos enthalten wertvolle Rohstoffe, die weiterhin nutzbar sind. Um sie recyceln zu können, entwickelt ein Forschungsteam vom Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion (ZDB) am Fraunhofer IPA eine Roboterzelle mit ganz verschiedenen Werkzeugen. Sie soll alle nötigen Arbeitsschritte der Demontage ausführen können und sich für sämtliche Batterietypen eignen.

Die Bestandteile einer Batteriezelle sollen sortenrein demontiert und anschließend geprüft werden, ob sie noch gut genug sind für eine direkte Wiederverwendung. Kein Arbeiter, sondern ein Industrieroboter soll die Arbeiten übernehmen. Das ist umso schwieriger, als Autobatterien nicht genormt sind. In verschiedenen Automarken, sogar in verschiedenen Modellen, stecken jeweils andere Stromspeicher. Roboter schraubt oder fräst das Gehäuse auf.

Als Arbeitsplatte dient ein zwei mal drei Meter großer Tisch mit einem flexiblen Spannsystem, das jeden Akku fest greifen kann. Dort öffnet der Roboter zunächst den Deckel, indem er die Schrauben aufdreht. Eine intelligente Bildverarbeitung weist ihm den Weg. Doch das klappt nicht immer, denn nach zehn Jahren bei Wind und Wetter ist manche Schraube korrodiert und lässt sich mit mehr lösen. Dank maschinellem Lernen erkennt der Roboter frühzeitig, ob er mit dem Schraubendreher ans Ziel kommt oder zur Fräse greifen muss.

Das Forschungsprojekt DeMoBat, das insgesamt drei Jahre läuft, hat gerade Halbzeit. Die Zwischenbilanz ist vielversprechend: Schon diesen Herbst soll ein erster Demonstrator zu sehen sein.

[> Weitere Informationen](#)

Mit Hochleistungsschichten zur effektiven Nutzung und Speicherung solarer Energie

Dünnschichtsysteme für Photovoltaik und Solarthermie tragen dazu bei, ein breites Spektrum der solaren Strahlung sowohl für die Stromerzeugung als auch in Form von Wärme einzusammeln. Mit den vom Fraunhofer FEP entwickelten Vakuumtechnologien können Schichten und Schichtsysteme rund um die Nutzung solarer Energie und die Speicherung von Wärme im industriellen Maßstab abgeschlossen werden und einen Beitrag zur verstärkten Nutzung dieser wichtigen Energiequelle leisten.

Die Forschenden am Fraunhofer FEP experimentieren mit Schichten von mehr als 20 Mikrometern Dicke. Diese werden mit einer Technologie realisiert, die sonst zur Folienbeschichtung genutzt wird. Schüttungen eines hochporösen Materials auf diese Weise gleichmäßig mit dicken Schichten zu versehen, ist daher eine große Herausforderung und die bisherigen Entwicklungen des Fraunhofer FEP sind durchaus einzigartig. Insbesondere Entwickler neuartiger Speichermaterialien mit Fokussierung auf die Maximierung der Speicherkapazität sind an den innovativen Schichtentwicklungen des Fraunhofer FEP interessiert. Solche neuen Speichermaterialien sind vor allem Hybridmaterialien, die noch nicht großtechnisch gefertigt werden,

wie das bei den Zeolithen der Fall ist. In der Regel werden sie nur in kleinen Mengen hergestellt und liegen in Pulverform vor. Am Fraunhofer FEP besteht damit künftig die Herausforderung, auch diese neuen Materialien in der Metallisierungsanlage zu behandeln.

[> Weitere Informationen](#)

LiDAR und autonome Autos: Keine 08/15-Lösung

Die beste LiDAR-Technologie für automobile Anwendungen?

Gibt es nicht, sagt Florian Friedl, Group Leader Automotive & Optoelectronic Components von Hamamatsu Photonics. Als umfassender Komponentenanbieter kennt das Unternehmen die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Systeme – und stellt hier die wichtigsten Unterschiede vor.

Oberhalb der Fabrikhalle oder im Auto: Smarte, autonome Systeme sind überall auf dem Vormarsch. Eine wichtige Voraussetzung für wirklich sichere und funktionstüchtige Systeme sind hochentwickelte Sensoren und Bildgebungsverfahren, die ein realitätsgetreues Abbild ihrer Umgebung generieren. Bereits aktuelle Advanced Driver Assistance Systeme (ADAS) verwenden rund hundert solcher Sensoren, um Funktionen wie Spurhalteassistenten oder automatische Abstandskontrollen zu gewährleisten. Absolute Genauigkeit und schnelle Reaktionszeiten sind dabei unabdingbar – auch bei hohen Geschwindigkeiten und unvorhergesehenen Situationen.

Eine der vielversprechendsten Entwicklungen der letzten Jahre ist dabei der Einsatz von LiDAR (Light Detection and Ranging) Systemen, einem optischen Verfahren zur Messung von Abständen und Geschwindigkeiten. Anders als beim verwandten Radar-System erfassen LiDAR-Sensoren ihre Umwelt allein mit Hilfe von Licht, das durch einen Photosensor erfasst wird. Doch LiDAR ist nicht gleich LiDAR, und Photosensor ist nicht gleich Photosensor. Welche Technologie die richtige ist, ist für den Hersteller nicht immer klar ersichtlich und hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab.

Bei der Auswahl und Zusammenstellung der richtigen Komponenten hilft Hamamatsu Photonics, ein führender Hersteller von optischen Produkten und Halbleiterkomponenten. Mit seinen Produkten deckt das Unternehmen die ganze Bandbreite der LiDAR-Technologien ab.

Laufzeitmessung oder kontinuierliche Frequenzmodulation?

Aktuell gibt es zwei grundsätzliche technologische Herangehensweisen an das LiDAR-Verfahren: Time of Flight, auch TOF oder Laufzeitmessung genannt, oder Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW), welche über Frequenzmodulation funktioniert. Während TOF LiDARs noch immer die Regel sind, erfreuen sich FMCW-Systeme zunehmender Popularität und versprechen, einige der Probleme des Time of Flight-Ansatzes aus dem Weg zu räumen.

Time of Flight: Rundreise für das Licht.

Das Konzept eines TOF LiDARs ist einfach: Eine Lichtquelle sendet einen konzentrierten Lichtstrahl aus, der von einem Hindernis – beispielsweise einem Fußgänger oder einem vorausfahrenden Auto – reflektiert und an einen Photosensor zurückgeworfen wird. Der Sensor berechnet die Entfernung des Objektes anhand der Zeit, bis das reflektierte Licht auf den Sensor trifft.

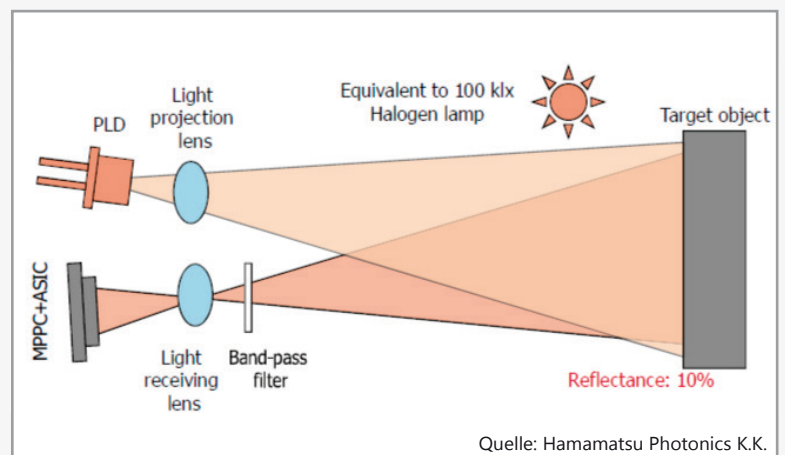
Als Strahlungsquelle werden häufig gepulste Laser eingesetzt, wobei zwei grundsätzliche Ansätze unterscheiden werden. Beim „Scanning LiDAR“ werden mehrere einzelne Lichtimpulse ausgesandt, die zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden. Um ein 360°-Bild der Umgebung zu erhalten, werden dazu häufig rotierende Plattformen mit mehreren Laserdioden eingesetzt. Ganz ohne mechanische Teile geht es beim Flash-Lidar: Hier wird die gesamte Umgebung mit einem Lichtimpuls geflutet, wobei der Beleuchtungsbereich dem Sichtfeld des Detektors entspricht. Als solcher dient ein Array von APDs, die unabhängig voneinander die ToF auf das Zielmerkmal messen.

Wellenlänge und Polarisationszustand des Impulses können variiert werden. Üblich sind

Wellenlängen zwischen 850 und 1.550 Nanometern, besonders häufig werden 905 nm eingesetzt. Niedrigere Wellenlängen erlauben den Einsatz von Silikondetektoren und zeigen eine günstigere Wasserabsorption. Zugleich müssen sie aber Laserstrahlen mit niedrigerer Energie einsetzen und eignen sich daher nicht für alle Anwendungen. Lichtwellen mit einer Länge von 1.550 nm setzen auf InGaAs-Detektoren und liefern auch über 200 Meter Entfernung bei einer Reflexion von 10 Prozent zuverlässige Ergebnisse. Dadurch eignen sie sich am besten für Anwendungen, die hohe Entfernungen erreichen müssen.

Eine Herausforderung der TOF-Technologie ist der Streuverlust des Lichtes: Nur ein kleiner Teil der emittierten Photonen findet jemals den Weg zurück zur aktiven Fläche des Photosensor. Umwelteinflüsse wie Regen oder Staubpartikel in der Luft sowie weitere reflektierende Oberflächen absorbieren einen Teil des Lichtes und reduzieren dabei die Menge der Photonen. Zugleich treffen andere Photonen als Hintergrundrauschen auf die Detektoren und können die Messgenauigkeit so negativ beeinflussen. Ein optischer Filter, der um die Wellenlänge des Lasers zentriert ist, kann Abhilfe schaffen, ganz lässt sich dieses „Hintergrundrauschen“ jedoch nicht verhindern. Mit zunehmender Entfernung sinkt deshalb auch die Genauigkeit des LiDARs.

Lidar concept



Frequency-Modulated Continuous Wave: Messen durch Modulieren

Eine Möglichkeit, dieses Problem der Störfrequenzen zu reduzieren, ist der Einsatz eines FMCW-LiDARs. Statt Lichtimpulsen wird hier ein kontinuierlicher, „gechirpter“ Laserstrahl ausgesendet, d. h. die Frequenz des Signals wird immer wieder geändert. Auch hier wird der Lichtstrahl von einem Objekt reflektiert und an den Photodetektor zurückgesandt. Entscheidend ist hier jedoch nicht die Zeit an sich, sondern der Unterschied in der Frequenz des eingehenden im Vergleich zum im selben Augenblick ausgehenden Signals. Anhand dieses Unterschiedes kann der LiDAR nicht nur den Abstand, sondern auch die Geschwindigkeit des sich bewegenden Objekts bestimmen.

Der Frequenzabgleich nimmt etwas mehr Rechenleistung in Anspruch als eine simple Zeiterfassung. Im Vergleich zu einem ToF-LiDAR benötigt das FMCW-Verfahren etwas mehr Zeit, um ein akkurates 3D-Umgebungsmodell zu erstellen. Die Technologie ist zudem relativ neu und daher oft noch sperrig und kostspielig. Auf der anderen Seite sind FMCW-LiDARs weniger anfällig für Störgeräusche und können eine höhere Laserleistung nutzen, ohne für die Augen gefährlich zu werden. Bei der Frage nach der „besten“ LiDAR-Technologie kommt es also sehr auf die intendierten Einsatzszenarien und Rahmenbedingungen an. Ebenso wichtig wie die Wahl des Verfahrens ist jedoch ein weiterer Aspekt: Der Einsatz des richtigen Photosensors.

Photosensoren: Genauigkeit vs. Reichweite?

LiDAR-Anwendungen verlangen Photodetektoren einiges ab. Im Idealfall sollten diese messempfindlich sein, um eine große Menge an Photonen aufzunehmen, ohne dabei zu viel Nebenrauschen zu detektieren. Gerade in automobilen Anwendungen ist es außerdem uner-

lässlich, dass die Sensoren schnell und absolut zuverlässig reagieren. Zudem sollten sie auch in großen Mengen produziert werden können, einer ganzen Reihe unterschiedlicher Umweltbedingungen – von Temperaturschwankungen bis zu wechselnden Lichtverhältnissen – trotzen können, und nicht zu letzt kosteneffizient sein. Hier gibt es große Unterschiede zwischen den Systemen: Silikon- und InGaAs-Variannten beispielsweise unterscheiden sich im Preis um etwa den Faktor zehn.

Für alle Photodetektoren gilt: Mit größerem Abstand zum zu erkennenden Objekt sinkt die Messgenauigkeit. Doch nicht für alle Arten von Detektoren ist diese Entwicklung gleich. Je nach Anwendungsfall sollten Hersteller deshalb zu einer von drei grundlegenden Arten von Photosensoren greifen.

PIN Photodiode

Eine PIN Photodiode ist die einfachste und zugleich kostengünstigste Art von Photosensor. Auch der Energieverbrauch ist mit einer Betriebsspannung von bis zu zehn Volt gering. Auf kurzen Distanzen ist das Signal stärker, bei zugleich weniger Verlust; Temperaturschwankungen beeinträchtigen die Leistung kaum. Der Auslesebereich ist relativ hoch, und auch bei starkem Umgebungslicht funktioniert eine PIN-Photodiode normalerweise problemlos. Als Ausleseschaltung kommt üblicherweise ein Transimpedanzverstärker zum Einsatz. Die Verstärkung für die PD ist allerdings ebenfalls gering und liegt bei 1.

Für Anwendungen, in denen das Licht keine weiten Strecken zurücklegen muss, ist der Einsatz einer PIN-Photodiode absolut ausreichend und bietet Herstellern das beste Preis-Leistungs-Verhältnis. Die S13773, eine Si-PIN-Photodiode von Hamamatsu Photonics, eignet sich durch ihre schnelle Ansprechzeit beispielsweise für Entfernungsmessungen im Spektralbereich zwischen 380 und 1.000 Nanometern. Bei 905 nm

erreicht sie eine Quanteneffizienz von 45 Prozent und eine Bandweite von 500 MHz. Auch Anwendungen mit viel Umgebungslicht oder starken Temperaturveränderungen profitieren vom Einsatz einer PIN-Photodiode – die S13773 etwa verträgt Betriebstemperaturen zwischen -40 und $+100^{\circ}\text{C}$.

APD

Wie der Name bereits verrät, bedienen sich Lawinen-Photodioden (avalanche photo diodes, kurz APD) des Avalanche-Effektes, um eine interne Verstärkung zu erzeugen. Dadurch werden Verstärkungen von über 100 erzielt, was den Sensoren eine größere Reichweite verleiht als PIN Photodioden. Um Messungenauigkeiten durch Hintergrundrauschen zu verhindern, müssen Hersteller jedoch meist zu einem Bandbreitenfilter greifen. APDs sind außerdem sehr temperaturempfindlich und weisen eine Betriebsspannung von 100-200 V auf. Neben Si APDs gibt es auch spezielle InGaAs APDs, die speziell für den Frequenzbereich von 1.550 nm entworfen wurden (G14858-Serie in der Produktpalette von Hamamatsu).

Lange galten diese beiden Varianten als Standard für ihre jeweiligen Anwendungsfelder: Zwar sind APDs aufwändiger und teurer als PIN-Dioden, für Anwendungen mit größerer Reichweite jedoch nahezu unverzichtbar. Seit einiger Zeit gibt es bei Hamamatsu aber einen Dritten Kandidaten im Rennen: sogenannte Multi-Pixel Photon Counters, kurz MPPC.

MPPCs

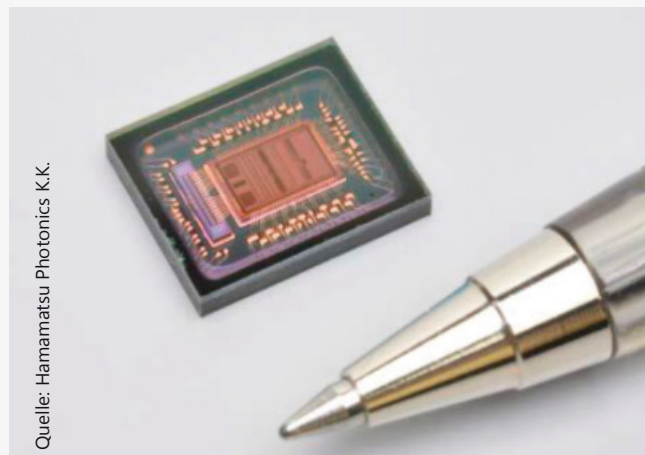
MPPC, auch bekannt als Silizium-Photomultiplier (SiPM) bestehen aus einer Reihe von APDs (hier als Channel bezeichnet), die im Geiger-Modus betrieben werden. Dadurch gewinnt ein MPPC-Sensor deutlich an Verstärkung – bis zu einem Faktor 106 sind hier problemlos möglich. Durch den Einsatz mehrerer parallel geschalteter APDs wird zugleich verhindert, dass

Informationen über die Anzahl der einfallenden Photonen verloren gehen. MPPCs eignen sich dadurch auch für Einzelphotonenerfassung und kommen so auch mit suboptimalen Bedingungen zurecht, beispielsweise bei sehr schwachem Lichteinfall zurecht. Sie liefern selbst auf große Entfernungen verlässliche Ergebnisse – bei zugleich geringer Reaktionszeit. Bei der Temperaturempfindlichkeit ordnen sich MPPCs zwischen APDs und PIN-Photodioden ein. Und während MPPCs ebenso wie PIN Photodioden oder APDs über einen Transimpedanzverstärker geschaltet werden können, sind auch weniger komplexe Ausleseschaltungen, wie ein Hochfrequenz-Verstärker, möglich.

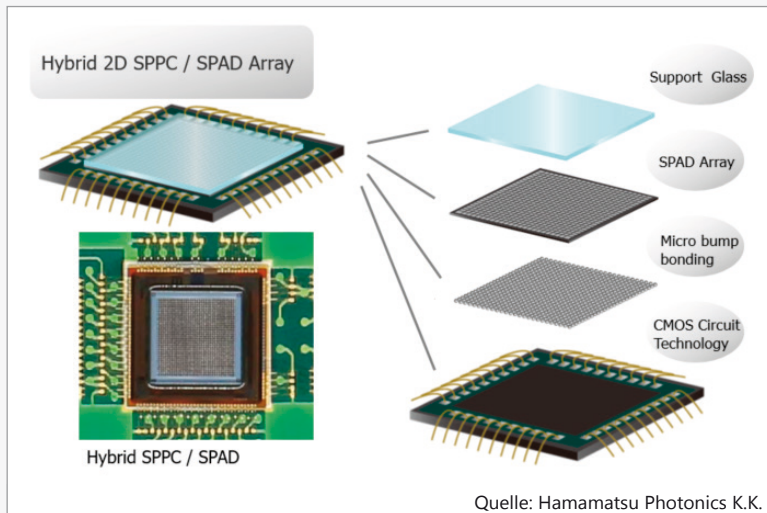
Für die neue Generation von MPPC-Detektoren von Hamamatsu wurde die Photonen-Detektions-Effizienz (PDE) bei 905 nm weiter verbessert. Diese Kombination aus Merkmalen macht MPPC Photosensoren zu einer attraktiven Alternative für viele automobilen Anwendungen, die bisher nur über APD Sensoren abgedeckt werden konnten.

Zusätzlich will das Unternehmen in naher Zukunft 2D SPPC-Arrays auf den Markt bringen. Ebenso wie MPPC Detektoren können auch diese „Single Pixel Photon Counter“ weite Entfernungen abdecken und zeigen ähnliche Charakteristika im Bereich Reaktionszeit und Temperaturbeständigkeit. Die Systemkosten liegen jedoch deutlich unter denen für eine MPPC-Lösung. Bisher hauptsächlich in der Quantenkommunikation eingesetzt haben

1D MPPC (SiPM) Array + ASIC;



Quelle: Hamamatsu Photonics K.K.



Hybrid SPAD

SPPC-Lösungen so das Potenzial, die Kosten für Hochleistungs-LiDAR-Anwendungen im Automobilbereich deutlich zu senken.

Ein wichtiger Schritt: Der Weg zu vollständig autonomen Industrie- und Automobil-Anwendungen ist steinig und weit verzweigt. Um dieser Komplexität gerecht zu werden, bedarf es individuell angepasster Lösungen. Customization statt Standard-Lösungen – diese Devise gilt auch für LiDAR-Systeme. Als One-Stop-Shop bietet Hamamatsu deshalb unabhängige Beratung und liefert alle Komponenten aus einer Hand, vom Photodetektor bis zur Laserdiode. Hier umfasst das Angebot sowohl gepulste als auch Dauerstrick-Laserdioden mit einem sehr genauen NFP (Near Field Pattern). Alle Komponenten sind dabei optimal aufeinander und die individuellen Anforderungen der Anwendung abgestimmt.

Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH

Hamamatsu Photonics ist der japanische Hersteller für optoelektronische Detektoren, Lichtquellen und Systeme.

Das Unternehmen wurde 1953 in der Stadt Hamamatsu City gegründet und hat bis heute dort seinen Standort für Forschung und Produktion. Hamamatsu Photonics zählt weltweit zu den Innovationsführern in der Photonik.

Hamamatsu Photonics entwickelt und produziert Komponenten auf der gesamten Bandbreite lichtbasierter Technologien und ist führender Hightech-Zulieferer für verschiedenste Industrien wie: chemische Analytik, Medizin-, Automobil-, Sicherheits- oder Röntgentechnik sowie Sensorik.

Im Bereich Systeme stellt Hamamatsu Photonics eine breite Palette von Bildverarbeitungssystemen her, die in Life Sciences, der digitalen Pathologie, der Halbleiterfertigung, der Prozesskontrolle als auch der Grundlagenforschung ihre Anwendung finden.

Die seit 1986 in Herrsching am Ammersee ansässige Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH, beschäftigt mehr als 100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern und betreut neben Deutschland auch die Länder: Bulgarien, Dänemark, Griechenland, Israel, Kroatien, Montenegro, Niederlande, Österreich, Polen, Rumänien, Slowakei, die Tschechische Republik, Türkei sowie Ungarn. Geschäftsführer ist Dr. Reinhold Guth.

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

Weitere Informationen



Florian Friedl
Group Leader Automotive
Hamamatsu Photonics
Deutschland GmbH
E-Mail: info@hamamatsu.de
Telefon: +49 8152 375 0

Rita Fritsch
Public Relations
Hamamatsu Photonics
Deutschland GmbH
Arzberger Straße 10
82211 Herrsching
Telefon: +49 8152 375-185
Fax: +49 8152 265-199
E-Mail: rfritsch@hamamatsu.de
www.hamamatsu.de

In Zusammenarbeit mit
Storymaker GmbH

Autorin:
Nina Blagojevic

Greifarm aus dem 3D-Drucker

für die Optikmontage mit höchster Präzision

Am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen werden seit einigen Jahren Lasersysteme für den Weltraumeinsatz entwickelt und montiert. Gleichzeitig erforschen die Aachener Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch Technologien für den metallischen 3D-Druck. Mit dem Verfahren Laser Powder Bed Fusion (LPBF) wurde erstmals ein neuer Präzisionsgreifarm aus Metallpulver in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Digital Additive Production DAP entwickelt und aufgebaut – für die Montage von Weltraumkomponenten im Reinraum ein Novum. Der Greifarm ist leichter als sein Vorgänger und doch stabil genug, um schwerere Laseroptiken ultragenau montieren und justieren zu können.

Dieses Präzisionswerkzeug bewegt deutlich schwerere Teile als das bislang eingesetzte Werkzeug, gleichzeitig ermöglicht es eine stabilere Justage.

[> Weitere Informationen](#)



Neues Spiegelteleskop zur Erdbeobachtung

bereit für den Flug zur Internationalen Raumstation ISS

Gemeinsam haben Forschende aus Jena und Freiburg ein neuartiges Spiegelteleskop für den Einsatz auf der Internationalen Raumstation ISS entwickelt. Die Erkenntnisse, die das Messinstrument dort in Zukunft liefern wird, sollen unter anderem Antworten auf den Klimawandel liefern und eine effiziente Nutzung von Wasser in der Landwirtschaft ermöglichen. Im Februar 2022 wird das Instrument seine Reise ins Weltall antreten. Gefördert wurde die Entwicklung des Teleskops vom »Digital Innovation Hub Photonics«, einer thüringischen Initiative zur Förderung von Gründungsvorhaben im Bereich Optik und Photonik.

[> Weitere Informationen](#)



Replikation von Zwei-Photonen-Lithographie- Strukturen für die Produktion strukturierter Kunststoffmikro- optiken in der Tumordiagnostik

Wie die Zwei-Photonen-Lithographie einen neuen Markt für massentaugliche komplexe optische Kunststoffbauteile eröffnet

Autoren: Stefan Wagner | Serhat Sahakalkan

Für die Reproduktion mikrostrukturierter Kunststoffbauteile ist Galvanokopieren ein schon bekanntes Verfahren, zur Herstellung strukturierter Werkzeugeinsätze für den Spritzguss. In einem mehrstufigen Prozess wird eine dicke Nickelschicht auf ein mikrostrukturiertes Grundsubstrat aufgebracht. In der sogenannten Galvanoform wird das Negativ des ursprünglichen Substrats abgebildet. Die anschließende Integration der Galvanoform in ein Spritzgusswerkzeug ermöglicht das Prägen der Negativstruktur in ein Kunststoffbauteil und wird daher oftmals zur Integration von Mikrostrukturen in Kunststoffoberflächen genutzt. Durch das gezielte Einbringen von Mikro- und Nanostrukturen an der Oberfläche von Kunststoffbauteilen lassen sich verschiedene optische und funktionelle Effekte in das Bauteil integrieren. Änderungen der Lichtbrechung, der

Benetzungseigenschaften oder auch Farbeffekte können mit der Galvanoreplikation ermöglicht werden. Wir möchten hier den Einsatz dieser Methode für Strukturgrößen im Bereich von wenigen Mikrometern bis zu unter 100 nm zeigen. Dieser Bereich ist besonders für mikrostrukturierte Optiken von großem Interesse. Durch den erhöhten Funktionsumfang dieser Optiken können neue Geschäftsfelder erschlossen werden, wie im Folgenden am Beispiel der Forschung zur intelligenten Tumordiagnostik [1] gezeigt wird. Für die Herstellung der komplexen Masterstrukturen vor dem Galvanokopieren eignet sich in diesem Größenbereich besonders die Zwei-Photonen-Lithographie.

Als Prototyping-Verfahren wurde die Zwei-Photonen-Lithographie schon frühzeitig diskutiert [2]. Lange Zeit zu Forschungszwecken verwendet, wurde mit dem Nanoscribe GT+

Über uns

Hahn-Schickard entwickelt intelligente Produkte mit Mikrosystemtechnik: von der ersten Idee über die Fertigung bis zum finalen Produkt – branchenübergreifend. Der Forschungs- und Entwicklungsdienstleister ist mit seinen Instituten an vier Standorten in Baden-Württemberg vertreten: in Stuttgart, Villingen-Schwenningen, Freiburg und Ulm. In vertrauensvoller Zusammenarbeit mit der Industrie realisiert Hahn-Schickard innovative Produkte und entwickelt Technologien in den Bereichen Sensorik, intelligente eingebettete Systeme für das Internet der Dinge, künstliche Intelligenz, Lab-on-a-Chip und Analytik sowie Aufbau- und Verbindungstechnik und elektrochemische Energiesysteme. Das Angebot umfasst die Herstellung von kleineren und mittleren Serien sowie die Überleitung in die Großserienfertigung.

Wir entwickeln für Sie intelligente Produkte mit Mikrosystemtechnik: von der ersten Idee bis zur Fertigung.



eines der ersten kommerziell erhältlichen Geräte für die Zwei-Photonen-Lithographie vorgestellt. Mit einer Auflösung im oberen Nanometerbereich bis hin zu wenigen 100 μm schließt das additive Verfahren eine entscheidende Lücke in der Mikro- und Nanoprozesstechnik. Während verschiedene Lithographie-Verfahren die Abbe'sche Auflösungsgrenze weit unterschreiten und die einstelligen Nanometer angreifen [3], sind gängige industrielle additive Strukturierungsverfahren, wie die Stereolithographie (SLA) oft auf die Auflösung weniger Mikrometer begrenzt. Erstgenannte sind vor allem in der Siliziumverarbeitung -und damit auch in einem sehr großen Massenmarkt- beheimatet, wohingegen die SLA als Verfahren der additiven Fertigung schon längst Einzug in Standardindustriezweige wie Automotive oder Medizin gefunden. Ein großes Problem der hochauflösenden Lithographiever-

fahren ist die Unfähigkeit nicht-periodische und komplexe 3D-Strukturen herzustellen. Die Stereolithographie bildet diese Eigenschaft zwar ab, erlaubt allerdings durch die geringe Auflösung nur selten die Herstellung hochpräziser Strukturen für optische Prototypen in der Mikro- und Nanostrukturtechnik.

Bei der Zwei-Photonen-Lithographie wird eine auf das Fokusvolumen eines Femtosekundenlaserstrahls konzentrierte Polymerisation eines photosensitiven Kunststoffharzes ausgelöst. Die geringe Tiefenschärfe verhindert dabei eine ausgedehnte Streuung um den Fokuspunkt, wodurch eine lokale Aushärtung des Harzes in der Größenordnung des Fokuspunktes stattfindet. Die dafür benötigte Energie wird durch die sogenannte Zwei-Photonen-Absorption bereitgestellt, welche dem Verfahren seinen Namen verleiht. Abhängig von der Anlage, kann das

Objektiv als Immersionsobjektiv in dem Kunststoffharz eingetaucht werden und kann während dem Belichtungsprozess in alle Raumrichtungen verfahren werden. Komplexe Strukturen mit hohen Freiheitsgraden und hoher Präzision können so vergleichsweise einfach gefertigt werden. Die hohe Genauigkeit bedeutet jedoch auch einen hohen Zeitaufwand.

Bestimmte Kunststoffharze, wie der Nanoscribe IP-S-Lack, eignen sich auf Grund des niedrigen Schrumpfs, hoher Stabilität und einem

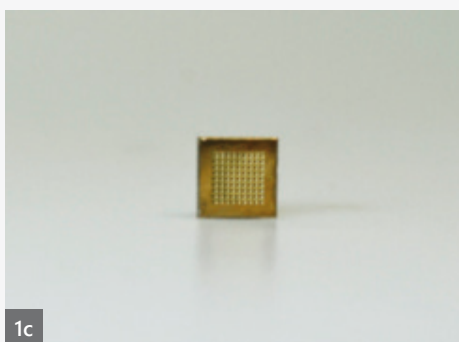
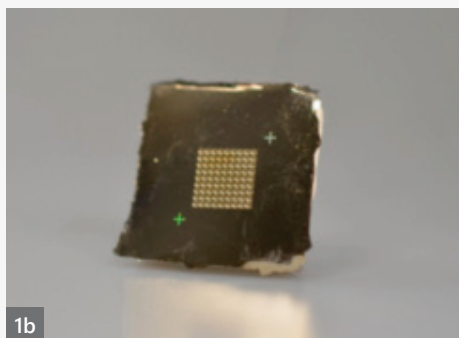
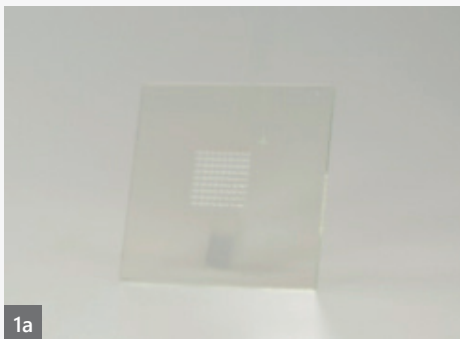


Abbildung 1:

a) Die Zwei-Photonen-Lithographie-Masterstruktur. Das Mikrolinsenarray konnte mit Hilfe der Galvanotechnik als Negativ in eine Nickel-Galvanoform übertragen (b) und erfolgreich nachbearbeitet werden (c)

Brechungsindex von 1,515 im ausgehärteten Zustand zur Herstellung optischer Prototypen mit Feature-Größen bis in den Nanometerbereich [4]. Eine mögliche Anwendung ist z.B. die Herstellung von Fresnell-Linsenarrays oder optischer Blazed-Gitter für die Verwendung in der Multi- und Hyperspektraldetektion für die Tumordiagnostik. Um den Weg für die Massenproduktion von optischen Kunststoffbauteilen mit Nanometer-Features zu ebnen, muss die Hürde der Geschwindigkeit des Verfahrens jedoch übersprungen werden. Eine Möglichkeit ist die galvanische Replikation der gedruckten optischen Bauteile und die Übertragung dieser Strukturen in ein fertiges Kunststoffbauteil mittels Spritzguss, bzw. Spritzprägen.

Die galvanische Replikation von komplexen optischen Masterstrukturen

In dem InnBW-Projekt „Intelligente Tumordiagnostik“ wurde von Hahn-Schickard (HS) in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Lasertechnologien in Medizin und Messtechnik (ILM) in Ulm eine Prozesskette zur galvanischen Replikation von Zwei-Photonen-Lithographie-Strukturen entwickelt. Diese ermöglicht hochpräzise, mittels Zwei-Photonen-Lithographie hergestellte, optische Mikrostrukturen vielfach in Kunststoff zu replizieren und schafft so eine Möglichkeit der Massenproduktion mikrostrukturierter Kunststoffbauteile für den Einsatz in optischen Demonstratoren. Mittels Methoden der klassischen Galvanotechnik, war es möglich komplexe Strukturen, welche mit dem Nanoscribe GT+ gefertigt wurden, in einen Nickel-Galvanoform zu überführen. Dazu wurden die Strukturen, eine optische Gitterstruktur und ein Fresnel-Mikrolinsen-Array, auf ein ITO (Iridium Tin Oxide)-beschichtetes Glassubstrat gedruckt. Um eine elektrische Leitfähigkeit auf

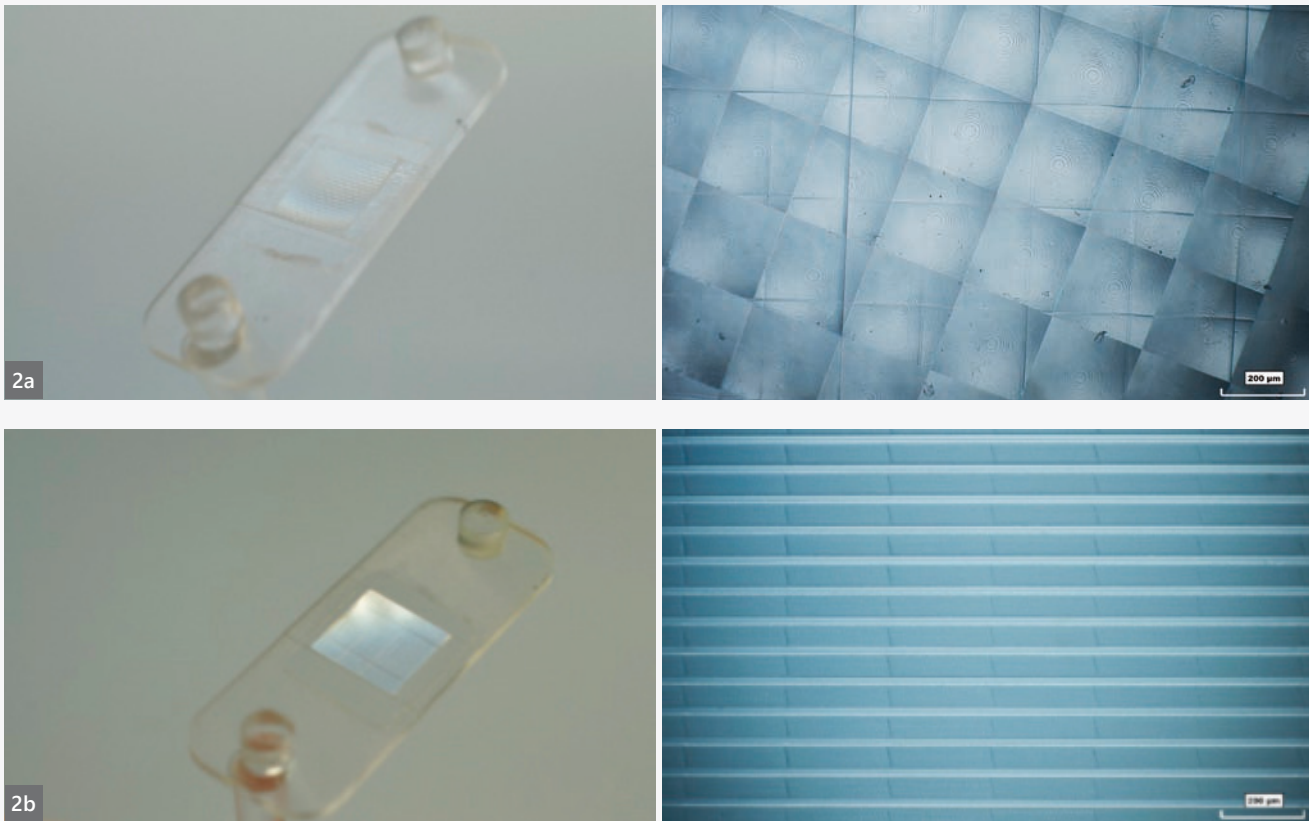


Abbildung 2: a) Kunststoffbauteil mit geprägten Mikrolinsen und b) geprägten Gitterstrukturen, welche im Projekt intelligente Tumordiagnostik hergestellt wurden.

der Oberfläche der gedruckten Strukturen zu erreichen, wurde eine zusätzliche Goldschicht mittels PVD-Prozess auf die Probe aufgebracht. Mittels additiv gefertigter Halterung wurde die Probe im Anschluss über einen Zeitraum von wenigen Tagen in ein Nickel-Galvanikbad getaucht. Um die ca. 5 mm hohe Nickelstruktur nachfolgend passgenau in ein Spritzgusswerkzeug zu integrieren, stehen Hahn-Schickard verschiedene Technologien der Ultrapräzisionsbearbeitung zur Verfügung. Neben dem Ultrapräzisionsdrehen –und schleifen, ist die Möglichkeit des Ultrapräzisionsfräsens auf einem Kugler Micromaster 5X-Fräszentrum gegeben. Das klimatisierte Fräszentrum ermöglicht die spanende Bearbeitung verschiedenster Werkstoffe, wie Kunststoffe, Keramiken oder Metalle mit einer Fertigungstoleranz von bis zu $\pm 2 \mu\text{m}$.

Der Nickelwerkzeugeinsatz wurde mit dem Kugler-Fräszentrum passgenau auf die dafür

vorgesehene Kavität im Spritzgusswerkzeug angepasst. Dies beinhaltet sowohl das Freistellen der Struktur, als auch die rückseitige Bearbeitung, um einen möglichst planen Einbau in das Werkzeug zu ermöglichen. Der aufnehmende Werkzeugstempel wurde mit einer zusätzlichen Vakuumanströmung versehen, um ein Herauslösen des Nickeleinsatzes während dem Spritzpräzessionsprozess zu verhindern.

Spritzprägen mikrostrukturierter Kunststoffoptiken

Beim Spritzprägen wird eine heiße Kunststoffschmelze unter hohem Druck in die noch geöffnete Kavität eines Spritzgusswerkzeugs eingespritzt. Die Werkzeughälften werden im Anschluss geschlossen und üben somit einen gleichmäßigen Druck auf die erstarrende Kunst-

stoffschmelze aus. Je nach Werkzeugaufbau ist im Anschluss ein partielles Prägen mittels beweglicher, strukturierter Werkzeugstempel möglich. Ist die Schmelze erstarrt, werden die Werkzeughälften geöffnet und das geprägte Bauteil kann entnommen werden.

Die zuvor ins Werkzeug übertragenen Linsen können somit erfolgreich in die Oberfläche eines Kunststoffbauteils geprägt werden. Auf Grund der hohen Genauigkeit der einzelnen Prozessverfahren ist die Abweichung der ursprünglich geschriebenen Mikrolinsen zu den geprägten Linsen marginal. Während die ursprüngliche Masterstruktur mit der entsprechenden Präzision über mehrere Tage hergestellt wurde, benötigen Spritzgussbauteile nur wenige Sekunden, bzw. Minuten in der Herstellung. Dies ermöglicht die Produktion von tausend und mehr mikrostrukturierten, optischen Bauteilen innerhalb eines Tages.

Nachdem die Prozesskette zur Integration der mittels Nanoscribe gefertigten Strukturen in Kunststoffoberflächen gezeigt werden konnte und somit der Weg für die Massenproduktion präziser optischer Kunststoffbauteile ermöglicht wurde, sollen die hergestellten Bauteile in einen entsprechenden funktionsfähigen Demonstrator überführt werden. Dieser soll im Rahmen des Folgeprojekts „Intelligente Tumordiagnostik 2“, welches seit dem 01.07.2021 offiziell gestartet

ist, aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Ziel ist es dabei einen miniaturisierten Demonstrator zur multispektralen Detektion von malignen Melanomen zu fertigen. Dieser soll die Diagnoseleistung herkömmlicher Systeme durch Methoden der Multispektralen Beleuchtung und KI-gestützter Analysen übertreffen. Neben Methoden zur Massenfertigung im Spritzguss sollen dafür auch Methoden des Rapid Prototypings in Form der Nanoprägelithographie untersucht werden, um in kurzer Zeit, möglichst flexibel kleine Chargen von funktionalen Kunststoffbauteilen der Zwei-Photonen-Lithographie zu ermöglichen.

Auf Grund der beschriebenen Fortschritte in der Skalierung der Zwei-Photonen-Lithographie konnte dieses Ziel in greifbare Nähe gerückt werden und eröffnet somit auch weitere Märkte. Der Einsatz multi- und hyperspektraler Detektion ist nicht nur im medizinischen Sektor interessant, sondern findet auch vermehrt Anwendung in der Forst- und Agrarwirtschaft, der Lebensmittelindustrie, sowie der Sicherheitsindustrie. Mit dem gemeinsam entwickelten miniaturisierten Demonstrator planen Hahn-Schickard und das Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik in Ulm weitere spannende Projekte, um industrielle Anwendungen dieser vielversprechenden Technologie umzusetzen.

Quellen

- [1] „20210630_Intelligente_Diagnostik_Abschlussbericht.pdf“. Zugegriffen: Dez. 01, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fzi.de/fileadmin/user_upload/PDF/Paper/20210630_Intelligente_Diagnostik_Abschlussbericht.pdf
- [2] B. H. Cumpston u. a., „Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication“, *Nature*, Bd. 398, Nr. 6722, S. 51–54, März 1999, doi: 10.1038/17989.
- [3] D. Fan und Y. Ekinci, „Photolithography reaches 6 nm half-pitch using EUV light“, in *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VII*, März 2016, Bd. 9776, S. 541–551. doi: 10.1117/12.2219737.
- [4] „Nanoscribe photoresins specifically designed for Two-Photon Polymerization“. <https://www.nanoscribe.com/en/products/ip-photoresins> (zugegriffen Dez. 01, 2021).



M.Sc. Stefan Wagner
Telefon: +49 711 685 81131
E-Mail: Stefan.Wagner@Hahn-Schickard.de



Dr. Serhat Sahakalkan
Telefon: +49 711 685 84265
E-Mail: Serhat.Sahakalkan@Hahn-Schickard.de

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.
Allmandring 9 b
70569 Stuttgart

www.hahn-schickard.de

Erweiterte Tiefenschärfe

Fraunhofer-Forschende entwickeln plenoptische High-Speed-Kamera

Forschende am Fraunhofer IZM entwickeln gemeinsam mit TecVenture, Optrontec Inc. und KAIST eine Hochgeschwindigkeitskamera, die mit einem Multilinsenarray ausgestattet ist und Aufnahmen mit einem erweiterten Tiefenschärfebereich ermöglicht. Die miniaturisierte Elektronik eignet sich beispielsweise für den Einsatz zur effizienten Schadensanalytik in industriellen Anwendungen oder für Forschungszwecke. Um die Kamera auch in rauen industriellen Umgebungen einsetzen zu können und einen kompakten Aufbau zu gewährleisten, wurde die Elektronik am Fraunhofer IZM mittels der Embedding-Technologie miniaturisiert. Je nach Anwendung wird die Kamera mit einem entsprechenden Objektiv versehen und das Bild auf einen Vollformatsensor fokussiert. Zwischen Bildsensor und Objektiv wird ein von KAIST und Optrontec in Korea entwickelter Multilinsen- oder Polarisationsfilter-Array in den Strahlengang gebracht. Dies ermöglicht eine größere Tiefenschärfe bzw. einen höheren Kontrast für strukturelle Details des beobachteten Objekts. Die Aufnahmegeschwindigkeit ist mit 2.000 Bildern pro Sekunde um bis zu 10-mal höher als bei üblichen Kameras. Dadurch werden sehr schnelle und kritische Prozesse in der industriellen Produktion oder in der Forschung für die detaillierte visuelle Analyse zugänglich. Das Mikrolinsenarray (MLA) besteht aus einem Feld von dicht angeordneten Linsen, die einen Abstand von 150 Mikrometern zueinander haben. Die notwendigen Komponenten zur Versorgung des Bildsensors sind unterhalb des Sensors hochintegriert in einem Embedded Modul untergebracht.

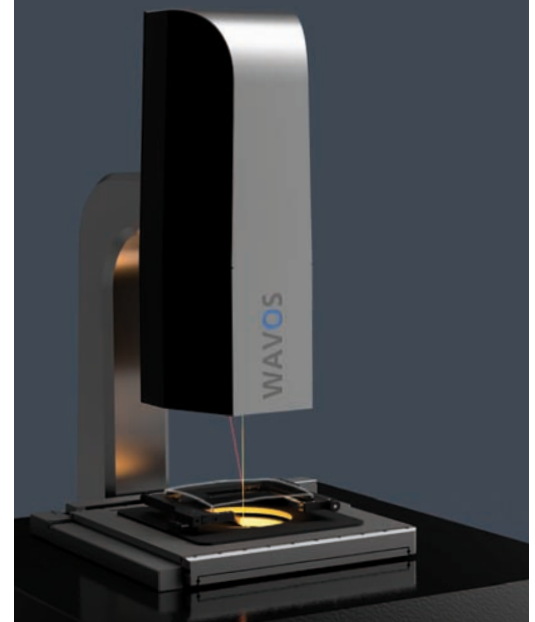
> [Weitere Informationen](#)

 **Fraunhofer**
IZM

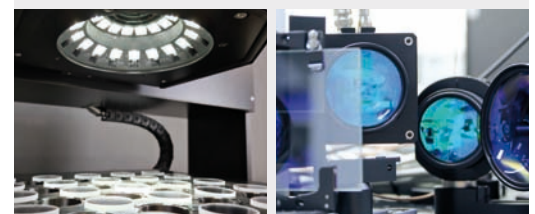
ANZEIGE

DIOPTIC

DIE SPEZIALISTEN FÜR
KOMPLEXE OPTISCHE
MESSTECHNIK

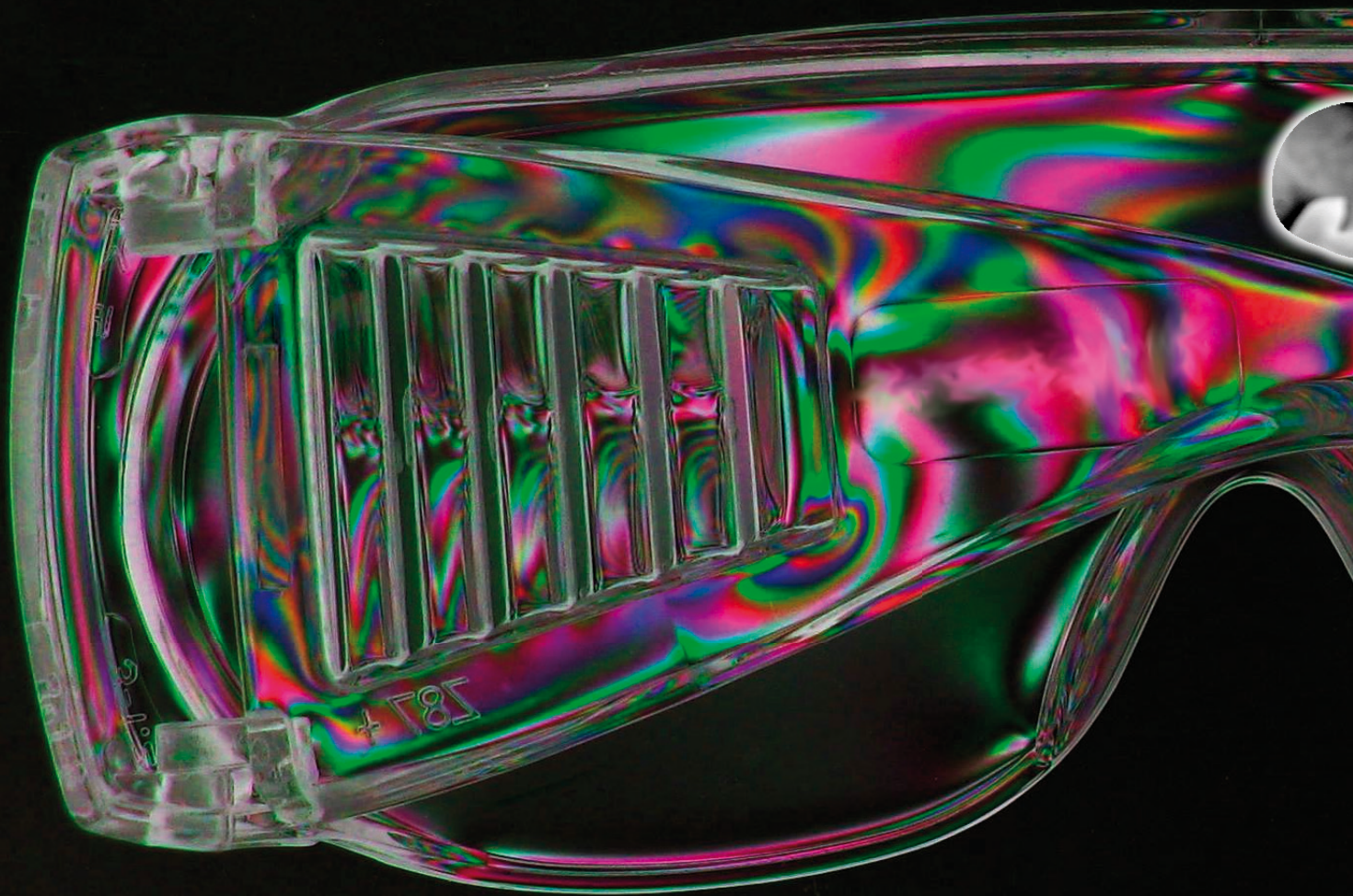


- Kundenspezifische optische Messtechnik auch für anspruchsvolle Oberflächen
- Objektive Pass/Fail-Prüfung mit Bericht nach vorgegebener Spezifikation
- Automatisierte Prüfung ohne Benutzereinfluss

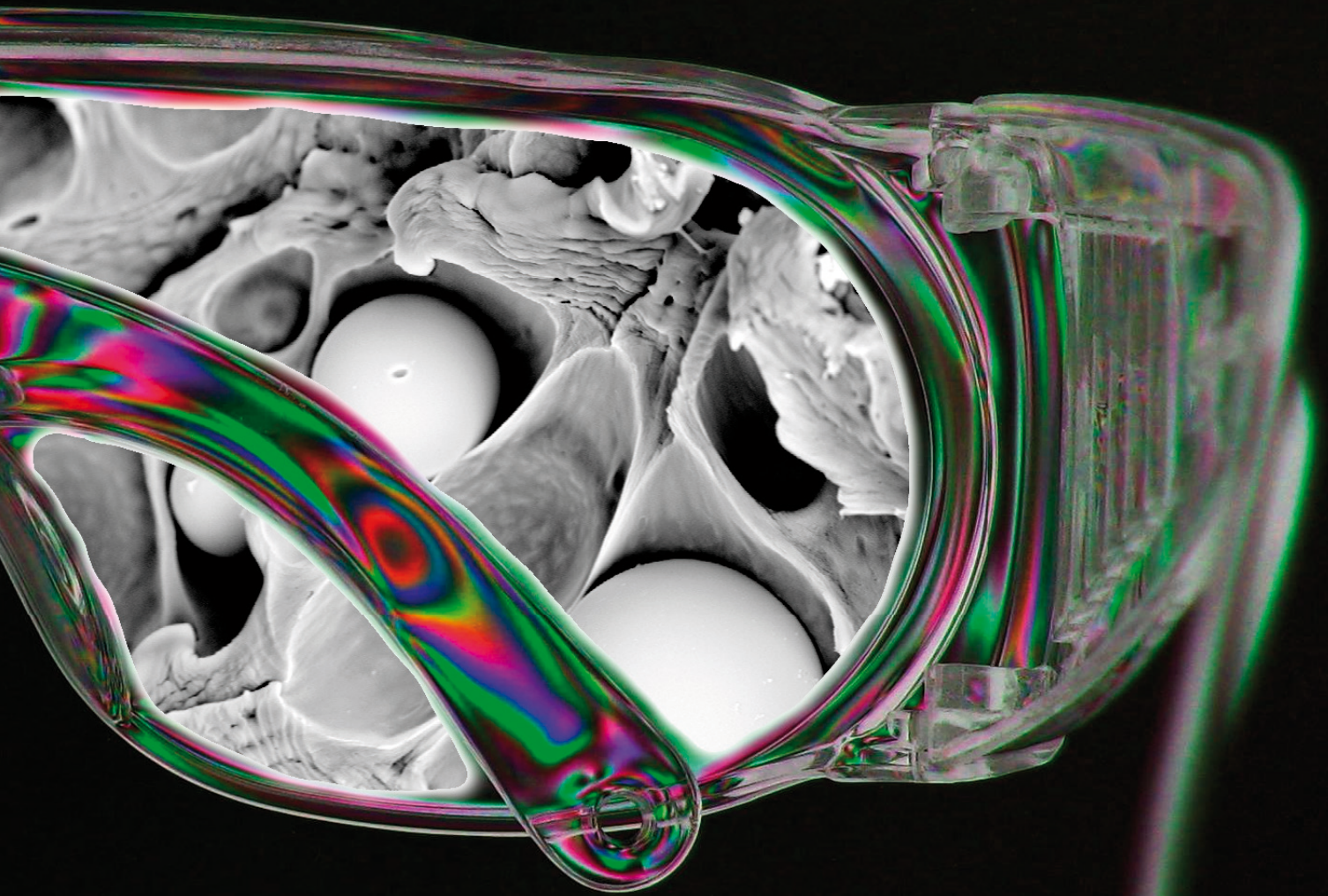


DIOPTIC
thinking your optics

www.dioptic.de
+49 6201 65040-00
info@dioptic.de



Schadensanalyse an **optischen Kunststoffen**



Autorin:

Meike Balster

Orientierungen in einer
Schutzbrille mit Blick
auf einen mit Glaskugeln
gefüllten Kunststoff

Der größte und unangenehmste Schadensfall bei Kunststoffteilen ist die Feldreklamation, da neben dem finanziellen Schaden auch ein Imageverlust droht. Nicht selten gerät aufgrund von Fehlern auch die gesamte Prozesskette ins Stocken. Aber auch Fehler in der Vorserie oder in Qualifizierungstests sind zu vermeiden, denn sie führen zu unnötigem Zeitverzug und höheren Kosten. Besser, wenn man gleich alles richtig macht. Doch wie geht man vor, wenn ein Bauteil oder eine Beschichtung versagt? Welche Lehren zieht man aus dem Schaden?

Jede Schadensaufklärung ist eine individuelle Prozedur, die für den Erfolg eine enge Zusammenarbeit der Beteiligten erfordert. Die Menge und Güte der Informationen, die Fähigkeit, diese zu sortieren und zu werten, aus ihnen die korrekten Schlüsse zu ziehen, dabei Fehlschlüssen sicher zu entgehen, das richtige Handwerkzeug zu besitzen und richtig anzuwenden, die Erkenntnisse sicher, präzise und verständlich zu dokumentieren, Abstellmaßnahmen abzuleiten und Empfehlungen zur Erfolgskontrolle auszusprechen erfordert ein breites Wissen, große Erfahrung und gute kommunikative Fähigkeiten.

Was muss man wissen?

Eine Schadensanalyse beginnt in der Regel mit der Identifizierung, Begutachtung und Dokumentation des auftretenden Fehlers. Dessen Beschreibung soll alle mutmaßlich relevanten Eigenschaften und Begleitumstände des Ausfallteils, der Peripherie und der mit dem Versagen in Verbindung stehenden Vorgänge umfassen. Als primäre Quelle können Qualitätsaufzeichnungen des Herstellers oder des Besitzers/Betreibers des Teils dienen. Interviews können wichtige Zusatzinformationen liefern, die zur Klärung des Schadensfalles beitragen können. Das Schadensszenario umfasst dabei nicht nur

den Zustand von Ausfallteilen, sondern auch deren Umfeld.

Darüber hinaus ist es hilfreich, ein möglichst vollständiges Bild vom „Lebenslauf“ eines Schadmusters zu zeichnen. Einige Fragen in diesem Zusammenhang sind z. B.:

- Um welches Material handelt es sich?
- Welcher Formgebungsprozess wird verwendet?
- Wann begann das Problem? Wie wurde es bemerkt? In welcher Phase des Lebenszyklus eines Ausfallteils trat der Fehler auf?
- Wurde der Artikel überhaupt schon in zufriedenstellender Qualität gefertigt? Wie verhält sich ein Referenzteil unter den Produktionsbedingungen des Ausfallteils?
- Gibt es Auffälligkeiten oder Änderungen im Produkt- oder Werkzeugdesign, des Prozesses, der beteiligten Maschinen, des Materials, des Personals, die den auftretenden Schaden begünstigen oder erklären?
- Wie waren die Bedingungen zum Ausfallzeitpunkt?
- Handelt es sich um einen Einzelfall, einen bestimmten Teil oder die gesamte Produktion?

Eine nicht zu unterschätzende Aufgabe ist das „Eindampfen“ der erhaltenen Informationen auf das Wesentliche. Eine sorgfältige Trennung von relevanten und unwesentlichen Fakten hilft bei der Entwicklung einer klaren Lösungsstrategie, der Festlegung des Untersuchungsumfangs und der nötigen Proben.

In den seltensten Fällen reichen die Ergebnisse einer solchen Bestandsaufnahme für die Schadensaufklärung aus. Daher sind Prüfungen und Analysen notwendig, die das Informationsbild vervollständigen.

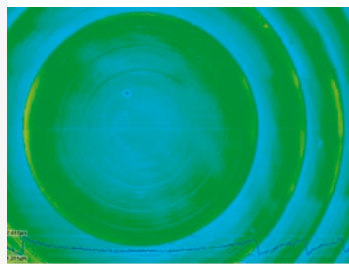
„Talk to the parts; they are smarter than the engineers.“

Dorian Shainin

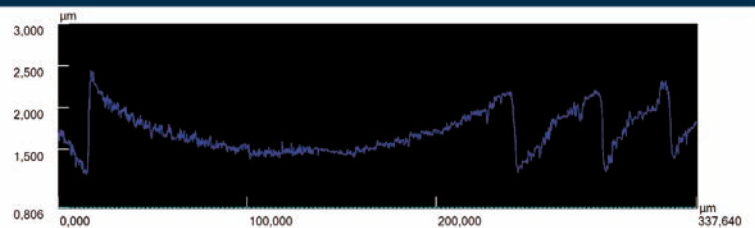
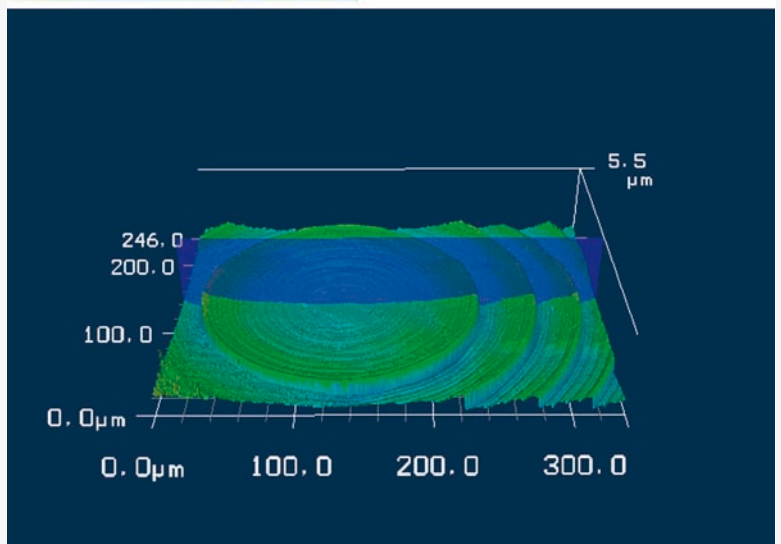
Die richtige Untersuchungsmethode

Häufig wird eine Analysemethode deswegen herangezogen, weil sie gerade verfügbar ist oder weil eine gewisse Erfahrung mit ihr besteht. Richtig ist, dass es eine Handvoll Verfahren gibt, die von zentraler Bedeutung sind, weil sie dem erfahrenen Experimentator mit überschaubarem Aufwand viele Informationen über die Probe liefern. Hierzu gehören die bildgebenden Verfahren (Lichtmikroskopie, Elektronenmikroskopie, Röntgen-Computertomographie), die auch deswegen geschätzt werden, weil „ein Bild mehr sagt als tausend Worte“. Die meisten Menschen lassen sich durch visuelle Argumente und Beweise einfacher überzeugen als mit Messdaten, Verlaufskurven, Diagrammen oder Spektren. Ist eine Linse trüb, kann, je nach Fall, hinsichtlich chemischem Angriff, nach der korrekt abgeformten Fresnel-Struktur oder nach Orientierungen und inneren Spannungen untersucht werden. Dennoch haben spektroskopische Verfahren, allen voran die Infrarotspektroskopie, aber auch andere, ihre Berechtigung, wenn es um die Charakterisierung von Werkstoffen geht. Trüben Stippen die Optik, so könnte beispielsweise Fremdmaterial identifiziert werden. Für viele Fragestellungen im Kunststoffbereich eignen sich thermische Analysen wie die DSC (Differential Scanning Calorimetry) oder die Thermogravimetrie. Erstere kann bei vielen Werkstoffen einen Einblick in die Vorgeschichte der Probe erlauben und helfen, die Prozessbedingungen nachzuvollziehen, unter denen ein Teil gefertigt wurde. Interessiert man sich für die (anorganischen) Füllstoffe, können Elemen-

tanalysen von Bedeutung sein, von denen es ungezählte Varianten gibt. Auch die Migration von Additiven, die zur Eintrübung oder Wolkenbildung führen kann ist eine weitere Untersuchungsmöglichkeit. Geht es um den Nachweis von Materialabbau bzw. -schädigung, greift man häufig zu viskosimetrischen Messungen, während die Größenausschlusschromatographie einen viel detaillierteren Blick auf die Materialqualität gewährt, bei gleichzeitig minimalem Materialbedarf. Ein Materialabbau kann z. B. zur Verfärbung der Optik führen. Manche Methoden eignen sich für die Analyse der Oberfläche, andere besser für die Gefügebeurteilung. Es gibt zerstörende und nicht zerstörende Verfahren.



Mikroskopische 3D-Untersuchung einer Fresnellinse



„Die richtige Methode“ ist also fallabhängig, und ihre Auswahl gehört zur Schadensanalyse dazu. Die Abteilung Material- und Schadensanalyse des Kunststoff-Instituts Lüdenscheid hält die genannten Verfahren im eigenen Haus vor; die Entscheidung für die bestgeeigneten Methoden und deren Anwendung können daher mit sehr kurzer Reaktionszeit erfolgen. Erfordert ein Problem spezielle Analysetechniken, sorgt ein Netzwerk aus erfahrenen und kompetenten Partnerlaboren dafür, dass die gesamte Palette materialanalytischer Werkzeuge zur Verfügung steht.



Kunststoff-Institut
Lüdenscheid
Karolinenstraße 8
58507 Lüdenscheid

Dipl.-Ing. Meike Balster, M.Sc.
Bereichsleiterin Material- und
Schadensanalyse
Telefon: +49 (0) 23 51 10 64-157
E-Mail: [mailto:m.balster@
kunststoff-institut.de](mailto:m.balster@kunststoff-institut.de)
www.kunststoff-institut.de

ANZEIGE

HESSEN

 TECHNOLOGIELAND
 HESSEN

VERNETZT.
ZUKUNFT.
GESTALTEN.

technologieland-hessen.de

Informieren, beraten, vernetzen

Das Technologieland Hessen unterstützt Unternehmen dabei, zukunftsweisende Innovationen zu entwickeln. Umgesetzt wird das Technologieland Hessen von der Hessen Trade & Invest GmbH im Auftrag des Hessischen Wirtschaftsministeriums.

Im Innovationsfeld Materialtechnologien unterstützen wir die hessischen Akteure bei der Entwicklung, Fertigung und Anwendung innovativer Materialien. Dabei legen wir einen besonderen Fokus auf Nachhaltige Materialien, Funktionsmaterialien und neue Fertigungsverfahren.

Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie,
Verkehr und Wohnen

Projekträger:
Hessen Trade & Invest GmbH

mobiler Unkraut-Killer in der Baumschule



© Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung/Fraunhofer

Die im AMU-Bot verbauten LiDAR-Scanner (roter Pfeil) senden während der Fahrt kontinuierlich Laserimpulse aus, mit deren Hilfe das System die Position der Pflanzenreihen erkennt

Fraunhofer-Forschende haben mit Partnern eine Plattform zur vollautomatischen Entfernung von Unkraut entwickelt. Das mobile Robotersystem AMU-Bot navigiert mit optischen Sensoren und entfernt Unkraut mechanisch, also ohne Einsatz von Chemie. Daneben arbeiten die Forschenden bereits an einem

umfassenden, datengestützten Ökosystem für eine ressourcenschonende und umweltfreundliche Automatisierung der Landwirtschaft.

[> Weitere Informationen](#)

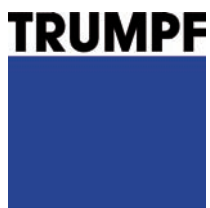


Lasersicherheit für 3D-Sensorenwendungen

Charakterisierung von VCSEL-Elementen für 3D-Sensorenwendungen gemäß IEC60825-1: Instrument Systems lanciert eine praxisnahe Lasersicherheitsbewertung für gepulste VCSEL-Arrays, die häufig in Consumer Electronics und in LiDAR-Anwendungen eingesetzt werden.

Instrument Systems hat, basierend auf der internationalen Lasersicherheitsnorm, ein praxistaugliches Konzept zur Lasersicherheitsbewertung von VCSEL entwickelt. Mit absolut kalibrierten und modularen Testsystemen, wie dem Pulsed VCSEL Tester PVT 100/110 und der kamerabasierten VTC 2400, kann eine vollständige Charakterisierung gepulster VCSEL-Arrays durchgeführt werden. Da VCSEL-Arrays ein drastisches Wachstum bei 3D-Sensorenwendungen – wie z. B. Face ID, Automotive LiDAR und Human-Machine-Interfaces (AR/VR) – verzeichnen, wird der Nachweis ihrer Augensicherheit immer wichtiger.

> [Videobeitrag zum Thema](#)



Finden statt Suchen mit 5G und Echtzeit-Lokalisierung

Ob Werkzeuge, Maschinen oder Materialnachschub: Die Indoor-Lokalisierungslösung des Hochtechnologieunternehmens TRUMPF ermittelt in Echtzeit die Position von Objekten in Produktions- und Lagerhallen. Damit werden zeitaufwendige Suchen in Fabrikhallen vermieden – Fertigungs- und Logistikprozesse effizienter und besser planbar.

Im Rahmen eines gemeinsamen Projekts ist es der Deutschen Telekom und TRUMPF nun gelungen, die Ortungstechnologie-Lösung in einem 5G Campus-Netz zu betreiben. Unternehmen können ihre Lokalisierungssysteme mit dieser 5G-gestützten Ultrabreitband-Technologie künftig flexibel und kostengünstig einrichten und an ihre Fertigung anpassen. Geplant ist, das Produkt im nächsten Jahr gemeinsam zu vermarkten.

2-Watt-Xenon-Blitzlichtmodul für Point-of-Care-Diagnostik und Umweltanalytik



Excelitas Technologies präsentiert eine neue gepulste 2-Watt-Xenon-Lichtquelle in einem ultrakompakten, völlig geschlossenen Gehäuse. Das breitbandige Blitzlichtmodul nPAX-N2 eignet sich perfekt für leichte, mobile Geräte, die in der Point-of-Care-Diagnostik und Umweltanalytik eingesetzt werden. Mit seiner herausragenden Lichtstabilität mit typischen Abweichungen $< 1,0\%$ gewährleistet die Lichtquelle eine konsistente Beleuchtung und trägt damit zu einer hohen Analysequalität bei. Blitzlampe, Triggerschaltung für Mikrosekunden-Lichtimpulse sowie eine Stromversorgung sind sämtlich in dem zylindrischen Gehäuse integriert. Die im Markt einzigartige gekapselte Ausführung erhöht die Funktionssicherheit und Haltbarkeit – das Modul hat eine Lebensdauer von mindestens 1 Mrd. Blitze.

> [Mehr Informationen](#)

ANZEIGE



Aktives Ausrichten von Kameramodulen mit unserem Einstiegssystem

ProCam® Lab

Mit ProCam® Lab bieten wir die ideale Lösung für unsere Kunden, die die kritische Herausforderung des aktiven Ausrichtens und die Fertigung von hochpräzisen Kameramodulen von geringen Stückzahlen meistern wollen. Dies erleichtert den Einstieg in das Kamerageschäft erheblich und die Prototypen können für die spätere Serienproduktion optimiert werden.



www.trioptics.com
A member of the JENOPTIK Group

Termine 2021/2022

Veranstaltung	Datum	Ort
DEZEMBER 2021		
Laser World of Photonics India	16.–18.12.2021	Bengaluru, India
JANUAR 2022		
CES	05.–08.01.2022	Las Vegas, USA
SPIE Photonics West	25.–27.01.2022	San Francisco, USA
MÄRZ 2022		
10. Internationaler Workshop zu Terahertz-Technologie und -Anwendungen	08./09.03.2022	Kaiserslautern
Light and Building	13.03.–19.03.2022	Frankfurt
electronic displays Conference	16.–17.03.2022	Nürnberg
W3+ Fair	16.–17.03.2022	Wetzlar
APRIL 2022		
MD&M	12.04.–14.04.2022	Anaheim, USA
OPIE Japan	20.04.–22.04.2022	Pacifico Yokohama, Japan
Hannover Messe	25.–29.04.2022	Hannover
LASER World of Photonics	26.–29.04.2022	München
MAI 2022		
Control	03.–06.05.2022	Stuttgart
9th European Seminar on Precision Optics Manufacturing	04./05.05.2022	Teisnach
AKL'22	04.–06.05.2022	Aachen

Termine 2022

Veranstaltung	Datum	Ort
AUGUST 2022		
LANE 2022	04.–08.08.2022	Fürth
SEPTEMBER 2022		
IFA	02.–06.09.2022	Berlin
CIOE	07.–09.09.2022	Shenzen, China
Glasstec	20.–23.09.2022	Düsseldorf
Optatec	27.–29.09.2022	Frankfurt
NOVEMBER 2022		
12. Wetzlarer Herbsttagung „Moderne Optikfertigung“	08.–09.11.2022	Wetzlar

APPLIKATIONEN

SYSTEME FÜR BILDVERARBEITUNG UND MACHINE VISION



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

SYSTEME FÜR BIOPHOTONIK, LIFE SCIENCE UND PHARMA



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

SYSTEME FÜR DRUCKTECHNOLOGIE UND GRAPHIK



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

SYSTEME FÜR FORSCHUNG UND WISSENSCHAFT



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

SYSTEME FÜR DIE HALBLEITER INDUSTRIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

APPLIKATIONEN

SYSTEME FÜR SENSORTECHNOLOGIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

BELEUCHTUNG



Kunststoff-Institut Lüdenscheid
 +49 (0) 2351 1064-191
 mail@kunststoff-institut.de
 www.kunststoff-institut-luedenscheid.de

INTELLIGENTE SYSTEME ZUR BELEUCHTUNGSSTEUERUNG



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

LEDS UND KOMPONENTEN



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

BILDGEBUNG

FASEROPTISCHE BELEUCHTUNG



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

BILDGEBUNG

LED BELEUCHTUNG



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

BIOPHOTONIK UND MEDIZINTECHNIK



Multiphoton Optics
 +49 (0) 931 908792 00
 info@multiphoton.de
 www.multiphoton.de

BIOTECHNOLOGIE

ZELLBIOLOGIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

MANIPULATIONS-TECHNIKEN

OPTISCHE PINZETTE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

BIOPHOTONIK UND MEDIZINTECHNIK

MEDIZIN

BIOCHEMIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

DERMATOLOGIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

HUMANGENETIK



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

NEUROLOGIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

PATHOLOGIE UND FORENSISCHE MEDIZIN



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

BIOPHOTONIK UND MEDIZINTECHNIK

MEDIZIN

MEDIZIN, ANDERE APPLIKATIONEN



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

MIKROSKOPIE UND BILDGEBUNG

ENDOSKOPIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

LINEARE- UND NICHT-LINEARE FLUORESCENZ-BILDGEBUNG



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

LINEARE- UND NICHT-LINEARE VIBRATIONSMIKROSKOPIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

MIKROSKOPIE IM ALLGEMEINEN (WEISSLICHT, PHASENKONTRAST)



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

BIOPHOTONIK UND MEDIZINTECHNIK

SPEKTROSKOPIE

FLUORESCENZSPEKTROSKOPIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

PHOTOLUMINESZENZ



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

RAMAN-SPEKTROSKOPIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

THERAPIE

LASERBASIERTE THERMOTHERAPIE



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de



BIOPHOTONIK UND MEDIZINTECHNIK

THERAPIE

PHOTODYNAMISCHE THERAPIE



Omicron
+49 (0) 6106 8224-0
mail@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de

PHOTOKOAGULATION



Omicron
+49 (0) 6106 8224-0
mail@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de

DIENSTLEISTUNGEN



Kunststoff-Institut Lüdenscheid
+49 (0) 2351 1064-191
mail@kunststoff-institut.de
www.kunststoff-institut-luedenscheid.de

BEHÖRDEN, INSTITUTIONEN, ORGANISATIONEN



Technologieland Hessen
+49 (0) 611 95017-8672
info@technologieland-hessen.de
www.technologieland-hessen.de

DIENSTLEISTUNGEN, ANDERE



Technologieland Hessen
+49 (0) 611 95017-8672
info@technologieland-hessen.de
www.technologieland-hessen.de

DIENSTLEISTUNGEN

KUNDENSPEZIFISCHE LÖSUNGEN



IMM Photonics GmbH
+49 (0) 89 321412-0
sales@imm-photonics.de
www.imm-photonics.de

OPTIKDESIGN UND INGENIEURDIENSTLEISTUNGEN



Omicron
+49 (0) 6106 8224-0
mail@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de

TECHNOLOGISCHE BERATUNG UND AGENTUREN



Technologieland Hessen
+49 (0) 611 95017-8672
info@technologieland-hessen.de
www.technologieland-hessen.de

DIODEN-LASER

DIODEN-LASER MODULE



Omicron
+49 (0) 6106 8224-0
mail@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de

DIODEN-LASER SYSTEME



Omicron
+49 (0) 6106 8224-0
mail@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de

DIODEN-LASER

GEPULSTE DIODEN-LASER



Omicron
+49 (0) 6106 8224-0
mail@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de

FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN FÜR OPTIKEN



Kunststoff-Institut Lüdenscheid
+49 (0) 2351 1064-191
mail@kunststoff-institut.de
www.kunststoff-institut-luedenscheid.de

BESCHICHTUNGEN VON STRAHLETLERN



Layertec
+49 (0) 36453 7440
info@layertec.de
www.layertec.de

DICHROITSCHES BESCHICHTUNGEN



Layertec
+49 (0) 36453 7440
info@layertec.de
www.layertec.de

DIELEKTRISCHE BESCHICHTUNGEN



Layertec
+49 (0) 36453 7440
info@layertec.de
www.layertec.de

FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN FÜR OPTIKEN

HOCHREFLEKTIERENDE BESCHICHTUNGEN



Layertec
+49 (0) 36453 7440
info@layertec.de
www.layertec.de

METALLISCHE BESCHICHTUNGEN



Layertec
+49 (0) 36453 7440
info@layertec.de
www.layertec.de

BESCHICHTUNGEN, VERSCHIEDENE



Edmund Optics
+49 (0) 6131 5700 0
sales@edmundoptics.de
www.edmundoptics.de

FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN FÜR OPTISCHE SYSTEME, SONSTIGES



Multiphoton Optics
+49 (0) 931 908792 00
info@multiphoton.de
www.multiphoton.de

FERTIGUNGSANLAGEN FÜR OPTIKEN, SONSTIGES



Multiphoton Optics
+49 (0) 931 908792 00
info@multiphoton.de
www.multiphoton.de

FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN FÜR OPTIKEN

ULTRAPRÄZISIONSBEARBEITUNG



Multiphoton Optics
+49 (0) 931 908792 00
info@multiphoton.de
www.multiphoton.de

ULTRAPRÄZISIONSKOMPONENTEN



AMETEK
+49 6150 543 7060
<https://www.taylor-hobson.com.de/contactus/contactus>
www.ametek.de

KOMPONENTEN ZUR LASERSTRAHLANALYSE



Multiphoton Optics
+49 (0) 931 908792 00
info@multiphoton.de
www.multiphoton.de

KOMPONENTEN FÜR DIE OPTISCHE ÜBERTRAGUNG

FASERKOPPLER



Omicron
+49 (0) 6106 8224-0
mail@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de

OPTISCHE FASERN



Omicron
+49 (0) 6106 8224-0
mail@omicron-laser.de
www.omicron-laser.de

LASERMATERIALBEARBEITUNG



Hamamatsu Photonics
+49 (0) 8152 3750
Info@hamamatsu.de
www.hamamatsu.com

LASER- SPEKTROSKOPIE UND -ANALYTIK, SPEKTROSKOPIE

FEMTO- UND PIKOSEKUNDEN-SPEKTROSKOPIE



Hamamatsu Photonics
+49 (0) 8152 3750
Info@hamamatsu.de
www.hamamatsu.com

LASERSYSTEME FÜR DIE FERTIGUNGSTECHNIK



Multiphoton Optics
+49 (0) 931 908792 00
info@multiphoton.de
www.multiphoton.de

LASER UND OPTOELEKTRONIK



Hamamatsu Photonics
+49 (0) 8152 3750
Info@hamamatsu.de
www.hamamatsu.com



IMM Photonics GmbH
+49 (0) 89 321412-0
sales@imm-photonics.de
www.imm-photonics.de

LASER UND OPTOELEKTRONIK

DIODENGEPUMPT FESTKÖRPERLASER



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

LASERKOMPONENTEN, SPIEGEL



Layertec
 +49 (0) 36453 7440
 info@layertec.de
 www.layertec.de

LASERKOMPONENTEN, VERSCHIEDENE



Edmund Optics
 +49 (0) 6131 5700 0
 sales@edmundoptics.de
 www.edmundoptics.de

LEDS UND KOMPONENTEN



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

NICHT-KOHÄRENTE LICHT- UND STRAHLSQUELLEN



Omicron
 +49 (0) 6106 8224-0
 mail@omicron-laser.de
 www.omicron-laser.de

OPTIK



Edmund Optics
 +49 (0) 6131 5700 0
 sales@edmundoptics.de
 www.edmundoptics.de

MEHRELEMENTLINSEN



Multiphoton Optics
 +49 (0) 931 908792 00
 info@multiphoton.de
 www.multiphoton.de

MIKROOPTISCHE KOMPONENTEN



Multiphoton Optics
 +49 (0) 931 908792 00
 info@multiphoton.de
 www.multiphoton.de

OPTISCHE SPIEGEL



Layertec
 +49 (0) 36453 7440
 info@layertec.de
 www.layertec.de

POLARISATOREN



Layertec
 +49 (0) 36453 7440
 info@layertec.de
 www.layertec.de

OPTIK

STRAHLTEILER



Layertec
 +49 (0) 36453 7440
 info@layertec.de
 www.layertec.de

OPTIKPRÜFGERÄTE

SPEKTROSKOPISCHE MESSUNGEN



Hamamatsu Photonics
 +49 (0) 8152 3750
 Info@hamamatsu.de
 www.hamamatsu.com

OPTISCHE INFORMATION UND KOMMUNIKATION

OPTISCHE TRANSMITTER, RECEIVER UND TRANSCEIVER



IMM Photonics GmbH
 +49 (0) 89 321412-0
 sales@imm-photonics.de
 www.imm-photonics.de

OPTIKPRÜFGERÄTE

SPEKTROSKOPISCHE MESSUNGEN



Hamamatsu Photonics
 +49 (0) 8152 3750
 Info@hamamatsu.de
 www.hamamatsu.com

OPTISCHE INFORMATION
UND KOMMUNIKATION

OPTISCHE TRANSMITTER,
RECEIVER UND TRANSCEIVER



IMM Photonics GmbH
+49 (0) 89 321412-0
sales@imm-photonics.de
www.imm-photonics.de

OPTISCHE MESSTECHNIK



Kunststoff-Institut Lüdenscheid
+49 (0) 2351 1064-191
mail@kunststoff-institut.de
www.kunststoff-institut-luedenscheid.de

INTERFEROMETER



AMETEK
+49 6150 543 7060
[https://www.taylor-hobson.com.de/
contactus/contactus](https://www.taylor-hobson.com.de/contactus/contactus)
www.ametek.de

SENSOREN, TESTS UND MESSTECHNIK

TESTSYSTEME FÜR OPTISCHE
KOMPONENTEN



AMETEK
+49 6150 543 7060
[https://www.taylor-hobson.com.de/
contactus/contactus](https://www.taylor-hobson.com.de/contactus/contactus)
www.ametek.de



Herausgeber

Photonics Hub GmbH
Ober-Saulheimer-Straße 6
55286 Wörrstadt

Handelsregister: HRB 48437
Registergericht: Amtsgericht: Mainz

Vertreten durch die Geschäftsführerin:
Daniela Reuter

Kontakt

Telefon: +49 67 32-93 51 22
Telefax: +49 67 32-93 51 23
E-Mail: info@photonics-hub.de
Umsatzsteuer-Identifikationsnummer
gemäß § 27 a Umsatzsteuergesetz:
DE320644526

Layout

Ulrike Speyer
Dipl. Grafik-Designerin
Am Rabenkopf 6
55270 Ober-Olm
E-Mail: ulispeyer@online.de